МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

А. Л. ДОРОФЕЕВ

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

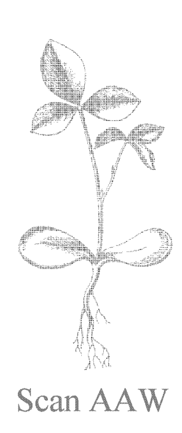


МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Выпуск 935

А. Л. ДОРОФЕЕВ

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ





МОСКВА · «ЭНЕРГИЯ» · 1977

6Ф2
Д69
УДК 538.54

Дорофеев А. Л.

Д69 Вихревые токи. М., «Энергия», 1977.

72 с. ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 935).

В книге рассказано об установках и приборах, действие которых основано на использовании вихревых токов, применяемых и разрабатываемых для испытания деталей и полуфабрикатов на отечественных и зарубежных машиностроительных предприятиях. Описаны физика вихревых токов и история открытия этого явления.

Книга рассчитана на широкий круг радиолюбителей, интересующихся применением методов электроники в промышленном производстве и других отраслях народного хозяйства.

Д $\frac{30404\text{-}029}{051(01)\text{-}77}$ 169-76 6Ф2

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наука о вихревых токах сделала первые шаги более полутора столетий тому назад: в 1820 г. были опубликованы лежащие в ее основе великие электротехнические открытия.

В отличие от обычных электрических токов измерить значение вихревых токов с помощью амперметра или гальванометра невозможно.

Вихревые токи используют для электромагнитного торможения, индукционной перекачки горячих металлических расплавов, индукционного нагрева, поверхностной высокочастотной закалки, электромагнитной подвески, в диатермии (лечение больных токами высокой частоты), в геологоразведке, для выявления металлических тел в неметаллических средах, контроля линейных размеров, неразрушающих и бесконтактных испытаний качества материалов и для многих других целей. Все эти технические направления объединены общими закономерностями, единой физикой явления, в основе которой лежит электромагнитная индукция.

Аппараты, создающие и использующие вихревые токи, содержат элементы радиопередающих и приемных устройств: генераторы переменного тока, усилители, индукторы-датчики (преобразователи). Это «передающая» часть. В миноискателях, геологоразведочных и дефектоскопических приборах есть «приемная» часть. В нее входят дешифратор (так как поступающая информация «зашифрована» и содержит много ненужных сведений), устройства, уменьшающие помехи, усилители, стрелочные индикаторы, звуковые и световые сигнализаторы, исполнительные механизированные и автоматизированные устройства. Закономерности распределения вихревых токов в материалах определяются их физическими свойствами, особенностью и характером тепловых процессов, тонкой кристаллической структурой и дефектами в материале. Замечательный советский электротехник Г. И. Бабат в книге «Электричество работает» [1] рассказал о различных электрических устройствах, открытиях и изобретениях, многие из которых только сейчас поняли по-настоящему. За свою короткую жизнь Г. И. Бабат подарил человечеству интересные идеи, реализация которых была невозможна техническими

средствами тех дней. Основным направлением его научного творчества были индукционный нагрев и поверхностная высокочастотная закалка. Свои исследования в области вихревых токов я начал под руководством Г. И. Бабата. Нашим первым увлечением был энергомагнитный вибрирующий бур.

Позднее, в середине 50-х годов, развитие авиастроения заставило нас заняться использованием вихревых токов для оценки качества материалов, применяемых в этой отрасли промышленности.

Эта книга рассказывает о том, как «работают» вихревые токи. Ее основная цель — привлечь внимание многочисленной армии радиолюбителей к проблемам неразрушающего контроля качества материалов полуфабрикатов и деталей.

Все замечания по содержанию книги приму с благодарностью.

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ТОКИ ФУКО

1. ОТКРЫТИЕ

Каждый, даже маленький шаг в науке об электричестве давался и дается с большим трудом. В ее основе лежат наблюдения, опыт и обобщения. 150 лет назад объектом наблюдения было свойство стрелки магнитного компаса «вздрагивать» при включении и выключении электрического тока, проходящего в рядом расположенном проводнике. Явление воздействия тока на стрелку компаса наблюдал и описал в 1920 г. Х. К. Эрстед [1]. Это была знаменательная веха на длинном пути великих открытий. Наряду с ней стоит веха, воздвигнутая Франсуа Араго[2]. В 1824 г. он открыл «магнетизм вращения», обнаружив, что стрелка магнитного компаса реагирует на быстро вращающийся рядом кусок меди.

За этим опытом последовали и другие. Вращали над магнитом проволочную короткозамкнутую рамку. Рамка следовала за магнитом. До беличьего колеса в роторе современного асинхронного двигателя оставалось несколько шагов.

А как объяснить магнетизм вращения?

Один из учеников профессора Араго — Бернард Леон Фуко, будущий член Парижской и Петербургской академий, обратил внимание на нагревание металлических тел при быстром вращении их в магнитном поле. В 1831 г. М. Фарадей, член Лондонского королевского общества, открыв явление электромагнитной индукции, объяснил и магнетизм вращения, и нагревание металлических тел при быстром вращении их в магнитном поле вихревыми токами, т. е. токами, которые замыкаются внутри металлического массива. Эти токи были названы токами Фуко.

Ракета устремилась в небо. Ее металлическая поверхность взаимодействует с магнитным полем Земли и в ней возникают вихревые токи, но пользы от них нет, так же как нет пользы и от вихревых токов, возникающих в магнитопроводах трансформаторов, электродвигателей и других электрических аппаратов. Наоборот, от них нужно защищаться, так как при этом выделяется тепло.

Имеется ряд книг об исследованиях по уменьшению вихревых токов и защите от них [9, 13].

---

[1] Эрстед Ханс Кристиан (1777—1851) — профессор датского университета в Копенгагене.

[2] Араго Доминик Франсуа (1786—1853) — профессор Парижской политехнической школы, преподаватель математического анализа и геометрии.

2. ФИЗИКА ЯВЛЕНИЯ

Изучая наследие М. Фарадея, великий английский ученый Дж. Максвелл создал электромагнитную волновую теорию. Существенной ее частью является открытие токов смещения в диэлектриках. Именно благодаря им электрический конденсатор пропускает переменный ток. Сопротивление конденсатора данной емкости для переменного тока тем меньше, чем больше его частота.

Диэлектрические свойства вещества также зависят от частоты. Один и тот же материал при воздействии на него поля низкой частоты—диэлектрик, поля высокой частоты — проводник. В знаменитых уравнениях Максвелла эти положения учитываются с помощью выражения $\sigma + j\omega\varepsilon$, где σ — удельная электрическая проводимость, ε — диэлектрическая проницаемость, ω — круговая частота, $j = \sqrt{-1}$. Поэтому волновое сопротивление среды в общем виде равно:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}}}.$$

Интересно, что еще Г. Герц показал, что для диэлектриков коэффициент преломления электромагнитной волны $p = \sqrt{\varepsilon}$. При $\sigma/(\omega\varepsilon) \ll 1$, мы имеем дело с диэлектриком, а если $\sigma/(\omega\varepsilon) > 1$ — с проводником.

Если материал претерпевает те или иные превращения, его сопротивление электрическому току изменяется. Расплавы некоторых диэлектриков — проводники; в частности, хорошо пропускает ток расплавленное стекло.

Удельная электрическая проводимость металлов при нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре находится в пределах от 0,5 до 61 МСм/м.

При работе с электропроводящими растворами удобнее пользоваться удельным электрическим сопротивлением $\rho = 1/\sigma$, которое изменяется от 10^{-7} до нескольких единиц Ом·м. Электропроводность большинства сильных растворов по мере увеличения концентрации растворяемого вещества сначала резко возрастает, а затем, достигнув максимума, начинает уменьшаться. Эта закономерность положена в основу кондуктометрии: изучение свойств электролитов разной концентрации по их электрической проводимости.

У ферромагнитных материалов на величину вихревых токов вместе с электрической проводимостью влияет магнитная проницаемость. Эта величина характеризует собой связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля. Магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля, формы рассматриваемого тела (так как конечные размеры любого магнетика приводят к появлению встречного поля, уменьшающего первоначальное), температуры и частоты тока возбуждения. Удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость — основные параметры материала, входящие в любые расчеты по вихревым токам.

Вернемся к явлению электромагнитной индукции.

Любое перемещение электронов связано с возникновением электромагнитного поля. И, наоборот, воздействие электромагнитного поля заставляет электроны перемещаться. Возбуждать электроны — это значит заставлять их перемещаться, отдавая энергию друг дру-

гу. Механизм этого воздействия и возбуждения связан с появлением и проявлением электромагнитного поля. Почему же возникает магнетизм вращения, почему вращающийся кусок меди воздействует на магнитную стрелку?

Вращение куска меди, который содержит огромное количество коллективизированных электронов, по сути дела, представляет собой перемещение их в заданном направлении, т. е. электрический ток. Именно такие опыты, проделанные в 1913 и 1916 гг. по внезапному торможению вращающейся катушки и двужущегося металлического диска, подтвердили существование электронов. Есть ток — есть и магнитное поле, которое действует в соответствии с правилом Ленца (1834 г.). Другая причина появления во вращавшемся куске металла электрического тока — магнитное поле Земли. Ток возникает, когда проводник пересекает магнитные силовые линии. Если они направлены с севера на юг, то встречное магнитное поле будет действовать с юга на север.

Как известно, электрический ток в реальных проводниках встречает сопротивление, вследствие чего выделяется тепло. Этим и объясняется нагрев вращающегося в магнитном поле металлического тела, впервые отмеченный Л. Фуко.

3. МИКРОМИР И ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

Выдающийся французский физик А. Ампер проводил опыты по определению сил, действующих на проволочную рамку с током при взаимодействии ее с магнитом. В 1820 г. он пришел к выводу, что магнитного поля, не обусловленного электрическими токами, вообще не существует. По современному представлению движущиеся вокруг ядра и вращающиеся вокруг собственной оси электроны образуют элементарные токи, с которыми связано явление магнетизма.

Наряду с магнитной проницаемостью μ магнитные свойства вещества характеризуются магнитной восприимчивостью, равной $1-\mu$, Магнитная восприимчивость большой группы диамагнитных веществ не зависит от напряженности магнитного поля, их магнитная проницаемость меньше единицы. Атомы диамагнитных веществ не имеют магнитного момента. Он возникает при наложении внешнего магнитного поля в результате дополнительного движения электронов. Этот эффект сравнительно невелик; в пара- и ферромагнетиках его обнаружить весьма сложно. К диамагнитным веществам относятся висмут, медь, графит. Возможно, что гроб Магомета был сделан из этих материалов, так как при определенных условиях они могут «парить» в воздухе. Однако в наше время такие опыты удалось проделать лишь с шариком из висмута диаметром в 1 мм.

Совсем другие свойства имеют ферромагнитные вещества. Атомы металла, обладающего магнитными свойствами, группируются в домены. Домен — это наименьший из известных постоянных магнитов. В каждом домене примерно 10^{15} атомов. Шесть тысяч доменов занимают объем, сравнимый с булавочной головкой.

В размагниченных ферромагнитных материалах домены ориентированы случайным образом и нейтрализуют друг друга. У магнитно-мягких материалов, например железа, небольшие внешние поля ориентируют домены вдоль силовых линий. Вследствие малой

удерживающей силы при снятии поля остается лишь слабое намагничивание.

Для симметричных полей часто используют понятия начальной динамической проницаемости $\mu_{адин}$ и комплексной магнитной проницаемости $\tilde{\mu}$.

Под начальной динамической магнитной проницаемостью понимают некоторую ее среднюю величину для динамического цикла намагничивания при заданном значении максимальной напряженности магнитного поля [12]. Комплексная магнитная проницаемость определяется отношением комплексных амплитуд индукции и напряженности магнитного поля $\tilde{\mu}=B/H$. Применение этого параметра вызвано тем, что на высоких частотах характер процесса перемагничивания связан не только отношением амплитуд магнитной индукции и напряженности магнитного поля, но и фазовым сдвигом между ними. Модуль комплексной магнитной проницаемости совпадает со значением начальной динамической магнитной проницаемости.

На низких частотах петля гистерезиса не очень сильно отличается от статической, на высоких же частотах она имеет форму эллипса.

В реальных металлах перемещающиеся электроны испытывают столкновения с дефектами кристаллической решетки, что приводит к снижению средней скорости их пробега. Дефекты структуры кристаллической решетки сильно влияют на электрическую проводимость металла, на его прочность, величину потерь энергии на перемагничивание (в ферромагнитных материалах).

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ

4. ПРИРОДА ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА

Переменное электромагнитное поле порождает вихревые токи в проводниках. Возникают маленькие или мощные электрические «смерчи», которые создают свое поле. Это вторичное поле действует в соответствии с правилом Ленца навстречу полю возбуждения.

Чем лучше проводник пропускает токи, тем ближе по величине к первоначальному встречное магнитное поле. В идеальный проводник, так называемый сверхпроводник, электромагнитная волна вообще не проникает, вихревые токи текут в бесконечно малой по толщине «кожице» материала. Возникающие на поверхности проводника вихревые токи создают своеобразный экран полю возбуждения. Этот экран уменьшает их собственную силу по мере увеличения расстояния от поверхности проводника. Несложные опыты показывают, что дело обстоит именно так. Их несложно проделать, имея генератор (или куметр), вольтметр, катушку диаметром 12—16 мм с индуктивностью 15—20 мГ и конденсатор переменной емкости.

Объектом испытаний может служить фольга (например, применяемая для обертки конфет или чая). Добротность катушки, т. е. отношение ее индуктивного сопротивления к активному сопротивлению $\omega L/R$, должна быть не меньше 20.

Составив параллельный колебательный контур из катушки и конденсатора и подключив его к генератору и вольтметру, систему настраивают в резонанс. Из фольги нарезают ровные квадраты, стороны которых должны быть больше диаметра катушки не менее чем в 2 раза.

Если установить катушку на металлическую поверхность, вольтметр покажет, что колебательный контур расстроился.

Будем последовательно устанавливать катушку на все увеличивающийся по толщине набор квадратов фольги и настраивать контур каждый раз в резонанс с помощью конденсатора переменной емкости. Нетрудно будет заметить, что если удельная электрическая

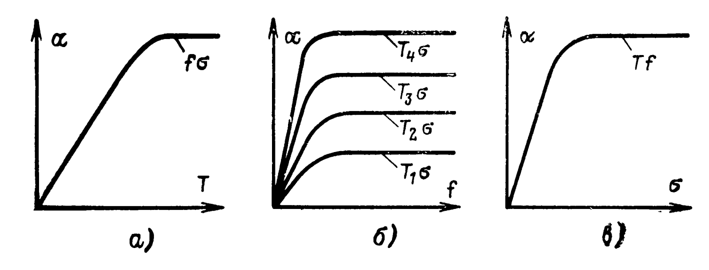


Рис. 1. Зависимость показаний вольтметра, подключенного к катушке индуктивности.

а — от толщины набора листов фольги при постоянных значениях частоты и удельной электрической проводимости материала; *б* — от частоты питающего тока при различных значениях произведения толщины материала на его удельную электрическую проводимость; *в* — от удельной электрической проводимости при постоянной толщине набора листов и частоте возбуждающего тока.

проводимость фольги и листа равны, то показания прибора при установке датчика на набор образцов, вырезанных из фольги, и лист той же толщины не отличаются. А это значит, что вихревые токи текут лишь по траекториям, параллельным плоскости раздела воздух — металл.

На основании этого опыта можно построить приведенную на рис. 1, *а* зависимость показаний вольтметра или индикатора от изменения толщины набора листов фольги $\alpha=\varphi(T)$. Она имеет участок с большим углом наклона, который характеризует зону чувствительности к изменениям толщины T.

Если настройка контура и толщина набора листов фольги постоянны, а изменяется частота питающего тока f, то показания приборов изменяются более резко. Изменяя толщину набора листов фольги, можно построить семейство кривых $\alpha=\varphi(f)$ для разных значений T (рис. 1, *б*). Из опыта следует, что при определенной толщине набора фольги и частоте питающего тока дальнейшее их увеличение не изменяет показания вольтметра. Такая предельная толщина набора будет характеризовать реальную глубину проникания вихревых токов. Изменяя удельную электрическую проводимость σ образцов и выдерживая постоянной толщину набора, можно построить семейство кривых $\alpha=\varphi(\sigma)$ (рис. 1, *в*). Если подобрать масштаб, то эти кривые совпадут с семейством кривых $\alpha=\varphi(f)$. Это означает, что обе величины f и σ одинаково влияют на изменения вносимых со-

противлений. Итак, на значение вихревого тока влияют: удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость материала, толщина образца и частота испытательного тока.

Это основные параметры, которыми оперируют в теории вихревых токов. В теории взаимодействия катушек с электропроводящими материалами приходится, кроме того, учитывать размеры объектов, диаметр, высоту катушек и тот факт, что в воздухе напряженность электромагнитного поля по оси катушки спадает очень быстро. На расстоянии, равном нескольким диаметрам катушки, она фактически равна нулю.

При объяснении поверхностного эффекта электротехника опирается на несколько важных формул, полученных с помощью анализа закономерностей взаимодействия электромагнитной волны и металла. Вместе с созданием этой теории совершенствовался и математический аппарат. Сейчас в высшей математике оперируют двумя важными понятиями: rot — ротором и div — дивергенцией — истоком. Ими пользуются, чтобы показать, имеем ли мы дело с вихревым или поступательным движением (перемещением). Оба понятия составляют основу знаменитых уравнений Максвелла — фундамента современной электродинамики. Запишем эти уравнения в так называемой квазистационарной форме, пригодной для решения задачи взаимодействия с металлом любой, в том числе плоской электромагнитной волны:

$$\mathrm{rot}\ \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} = J; \quad \mathrm{rot}\ \mathbf{E} = -j\omega\mu \mathbf{H},$$

где $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля; $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля; J — плотность тока.

Первое уравнение выражает закон полного тока, второе — закон электромагнитной индукции.

Вихрь магнитного поля рождает электрическое поле, а вихрь электрического поля порождает магнитную волну, действующую в противоположную сторону. Из этой записи уравнений следует, что речь идет о периодическом синусоидальном поле; множитель j означает, что составляющие поля сдвинуты на 90°.

Решать эти уравнения не будем, скажем только, что в воздухе, когда $\sigma = 0$, вихрь магнитного поля породить электрический ток не может. Тогда пишут: $\mathrm{rot}\mathbf{H} = 0$ и говорят, что в этой области пространства магнитное поле потенциально и обладает скалярным магнитным потенциалом. Его характеризует потенциальная функция. В пространстве, где $\sigma \neq 0$, приходится вводить вектор-потенциал. Решение уравнений Максвелла для простейших случаев описано в учебниках, например в работе [23].

Напряженность магнитного поля при условии, что на поверхности проводящей среды она равна некоторому значению $\mathbf{H}_0$,

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{\sqrt{-j\sigma\mu\omega z}} + \mathbf{H}_0 e^{\sqrt{j\sigma\mu\omega z}}.$$

Из уравнения видно, что в этом случае существуют падающие и отраженные волны.

Вторая часть выражения используется тогда, когда речь идет о тонких проводниках. Если имеется в виду достаточно толстый проводник, то вторую часть выражения отбрасывают. В этом случае говорят, что имеется лишь прямая волна, отраженной электромагнитной волны нет.

Мгновенное значение напряженности магнитного поля

$$H = H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \alpha z + \varphi).$$

Множитель $H_0 e^{-\alpha z}$ характеризует изменение амплитуды, а множитель $\sin(\omega t - \alpha z + \varphi)$ — изменение фазы волны, проникающей в глубь материала. Фаза плоской электромагнитной волны в любой плоскости параллельной поверхности раздела — постоянна

Величину $\sqrt{j\omega\mu\sigma}$ называют постоянной вихревых токов. Вещественная ее часть α позволяет определить глубину проникания магнитной составляющей поля и глубину проникания в проводник вихревых токов.

Под глубиной проникания δ вихревых токов понимают расстояние z, на котором амплитуда вихревых токов уменьшается в e раз. При этом $H_0 e^{-\alpha\delta} = H_0/e$. Поэтому $\delta = 1/\alpha$. Ослабление поля на глубине δ равно 1 Нп.

Расстояние λ_1, на котором фаза волны изменяется на 2π, определяется из условия $\lambda_1 = \frac{2\pi}{\alpha}$, где

$$\alpha = \frac{\sqrt{\omega\mu\sigma}}{2}.$$

Это расстояние называют длиной волны в металле, на нем волна затухает в 536 раз, т. е. до 0,00187 от ее значения на поверхности.

Глубина проникания вихревых токов на трех частотах для некоторых материалов с заданными значениями удельной электрической проводимости приведена в таблице.

Металл	Удельная электрическая проводимость при 20°С, МСм/м	Глубина проникания вихревых токов, мм, на частотах		
		50 Гц	10 кГц	1 МГц
Медь	57,0	9,4	0,66	0,066
Алюминий	36,0	12,4	0,84	0,084
Цинк	16,7	17,7	1,24	0,124
Латунь	13,5	19,5	1,37	0,137
Олово	8,35	25,0	1,75	0,175
Свинец	4,75	33,0	2,30	0,230
Железо (μ=200)	25,0	3,3	0,24	0,024
Сталь (μ=2000)	5,40	1,3	0,093	0,0093

Приводимую в таблице расчетную глубину проникания без оговорок используют для практического анализа взаимодействия катушек сравнительно большого диаметра с плоским металлическим телом достаточно большой толщины. Напряженность поля реальных катушек в воздухе уменьшается очень быстро, причем это уменьшение зависит от радиуса и высоты намотки катушек. Если высота h и диаметр намотки катушки D соответствуют условию $0{,}5 < h/D < 2$, то ослабление поля вдоль оси катушки достаточно точно учитывается множителем $e^{-\frac{4h}{D}}$ и реальная глубина проникания вихревых токов для такой катушки $\delta_p = \delta e^{-\frac{4h}{D}}$.

По мере уменьшения высоты намотки катушки показатель степени сомножителя стремится к значению $D/8$; при $h=D/4$ из-за ослабления поля в воздухе по оси катушки реальная глубина проникания вихревых токов оказывается в 3 раза меньше расчетной.

Заметим, что в плоском металлическом массиве электромагнитная волна затухает слабее, чем в прутке на таком же расстоянии от поверхности.

При переходе электромагнитной волны из воздуха в металл важную роль играет относительный показатель преломления p, равный отношению длины волны в воздухе λ к длине волны в материале, т. е.

$$p=\lambda/\lambda_1.$$

Если его значение велико, то независимо от угла падения угол преломления электромагнитной волны близок к нулю. Другими словами, под каким бы углом волна ни падала на металлическую поверхность, она будет входить в металл практически по нормали к поверхности. Это условие сохраняется и для криволинейной поверхности, если радиус ее кривизны значительно больше глубины проникания вихревых токов. Если $p>1000$, то какова бы ни была форма электромагнитного поля в воздухе, оно будет распространяться в металле нормально к поверхности раздела, и вихревые токи будут течь в плоскости, параллельной этой поверхности.

5. БОРЬБА С НАВОДКАМИ

Любой проводник, имеющий переменный электрический потенциал или по которому течет переменный электрический ток, может быть источником помех.

Между двумя близко расположенными проводниками существует емкостная связь. Ее можно устранить или уменьшить, располагая между предметами немагнитный металлический экран. Последний соединяют с одним полюсом источника переменной э. д. с., так как иначе емкость между предметами может не только не уменьшиться, но и увеличиться, что приведет нс к уменьшению, а к увеличению наводки.

Экранирование, устраняющее воздействие проводников друг на друга через емкость, называют электростатическим.

Низкочастотные цепи таким способом экранировать не удается вследствие наличия взаимной индуктивности. Здесь для экранирования от внешний полей используют ферромагнитные материалы, конструктивно выполняя экран в виде кожуха с достаточно толстыми стенками. Кожух имеет малое магнитное сопротивление и замыкает все магнитные силовые линии. Швы и разрезы кожуха должны идти параллельно магнитным силовым линиям.

От переменных электрических и магнитных полей можно экранироваться с помощью вихревых токов. Если на пути переменного электромагнитного поля установить замкнутое кольцо, то внутри него поле будет существенно ослаблено из-за вихревых токов. Катушки индуктивности помещают в алюминиевый или медный кожух. Его диаметр должен быть достаточно большим, иначе индуктивность катушки и ее добротность сильно уменьшаются.

Ослабляющее действие экрана из немагнитного металла возрастает с увеличением толщины его стенок и частоты поля помехи,

6. ПОТЕРИ НА ГИСТЕРЕЗИС И ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

С вихревыми токами в магнитопроводах электротехнических устройств связаны потери электромагнитной энергии на тепло. Особенно важно считаться с этим фактором в трансформаторах, электродвигателях и других устройствах, содержащих ферромагнитные цепи. В них потери энергии на тепло определяются потерями на перемагничивание (потери на гистерезис, связанные с вихревыми токами в микрообъемах) и потерями, вызванными вихревыми токами в макрообъемах.

Потери обоих видов характеризуются площадью петли гистерезиса. Различают статическую и динамическую петли гистерезиса. Статическую петлю (рис. 2,*а*) получают воздействием на ферромагнитное тело постоянным магнитным полем. Изменяя направление намагничивающего тока, получают замкнутую симметричную петлю гистерезиса. Площадь ее характеризует потери на перемагничивание ферромагнитного материала в постоянных полях или переменных полях частотой не более 5—6 Гц.

Динамическую петлю (рис. 2,*б*) получают в переменных полях более высоких частот. Она характеризует оба вида потерь и значительно шире статической петли. При небольших напряженностях поля динамическая петля гистерезиса близка по форме к эллипсу (рис. 2,*в*). Холоднокатаная сталь петлю такой формы имеет при магнитной индукции до 1 Т.

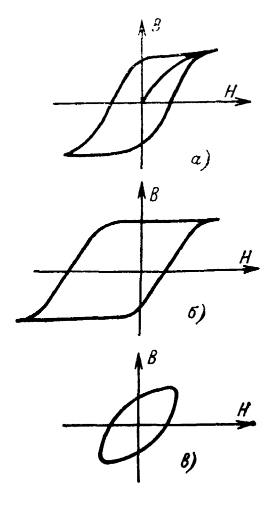


Рис. 2. Петли гистерезиса.

а — статическая; *б* — динамическая; *в* — динамическая при малой напряженности магнитного поля.

Всякая кривая несинусоидальной формы содержит ряд гармонических составляющих. Поэтому ферромагнитный сердечник порождает гармоники. При синусоидальном напряжении наличие в цепи с ферромагнитным сердечником добавочного постоянного тока позволяет получить несимметричную форму тока с нечетными и четным гармониками, так как динамическая петля становится несимметричной.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

7. ИНДУКЦИОННЫЙ ТОРМОЗ

Магнетизм вращения имеет и обратную сторону. В магнитном поле движение металлического тела замедляется. Это легко показать, раскачивая монету, подвешенную на нити, между полюсами магнита.

На этом принципе действуют демпферные устройства электроизмерительных приборов. Они хороши тем, что не имеют трения покоя. Как только основная часть прибора — рамка перестает двигаться, тормозной эффект исчезает. Если его нет, то возникают собственные медленно затухающие колебания стрелки. Она будет колебаться определенное время, после чего остановится и укажет значение измеряемой величины. В магнитоэлектрических приборах таким тормозом служит алюминиевый каркас рамки, представляющий собой короткозамкнутый виток

Но и сама замкнутая накоротко обмотка при движении является источником сил, вызывающих торможение. Поэтому при транспортировке, чтобы сотрясения не повредили механизм, зажимы электроизмерительных приборов замыкают накоротко.

Триумф индукционных токов — беличья клетка ротора асинхронного двигателя. Работая в режиме генератора, такой двигатель становится тормозом. Замыкая якорь на реостат, тормозную силу можно изменять. В индукционных счетчиках электроэнергии тормоз выполнен в виде плоского алюминиевого диска, который поворачивается внутри узкой щели между полюсами сильного постоянного магнита. Чем быстрее вращается диск, тем больше тормозная сила. Интересно, что вращаться этот диск также заставляют вихревые токи.

8. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ И ПОВЕРХНОСТНАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЗАКАЛКА

Еще одно сильноточное направление применения вихревых токов — индукционный нагрев материалов.

В разработке устройств индукционного нагрева перед Великой Отечественной войной и во время ее принимали участие наши крупные ученые: В. П. Вологдин, Г. И. Бабат, М. Г. Лозинский, А. Д. Свенчанский и др.

При индукционном нагреве вихревые токи индуцируются непосредственно в материале или специальном нагревателе. Возбуждающий виток — индуктор помещают в центре печи или огнеупорный тигель вставляют в индуктор — спираль из медной трубки. Чем меньше зазор между индуктором и расплавленным металлом, тем интенсивнее вихревые токи и меньше потери энергии.

По сравнению с другими плавильными печами индукционные печи обладают рядом преимуществ: они обеспечивают получение очень чистой продукции, бóльшую скорость нагрева, возможность плавки в защитной газовой среде или в вакууме. Строят их емкостью от нескольких граммов до десятков тонн. Только с помощью индукционных печей металлургам удалось создать новые сплавы и осуществить их промышленный выпуск.

Индукционный нагрев широко применяют и в машиностроении. С его помощью осуществляют поверхностную закалку стали и чугуна, отпуск стали после закалки, нагрев металлов для обработки под давлением, химико-термическую обработку, сушку лакокрасочных покрытий.

Практически полное отсутствие окалины и обезуглероживания поверхности поковок при скоростном индукционном нагреве устраняет излишний расход металла на припуски, способствует

повышению стойкости ковочных станов. Встраивание индукторов в ковочные машины обеспечивает получение более качественных поковок и улучшает культуру производства в кузнечном цехе.

Индукционный нагрев применяют для соединения торцов труб встык, при непрерывном ведении процессов сварки (например, при изготовлении труб из лент), при наплавке твердых сплавов на быстроизнашиваемые детали машин.

Существуют материалы, например шихта, для изготовления стекла, электрические свойства которых зависят от температуры. В холодном состоянии шихта — диэлектрик, с повышением температуры ее диэлектрические свойства снижаются и, наконец, она становится электропроводящей.

Пластмассы, древесину, пищевые продукты, литейную формовочную землю, бумагу и другие диэлектрические материалы нагревают с помощью электрического поля высокой частоты. Такой нагрев производят между обкладками конденсатора, воздействуя на материал электромагнитным полем, что обеспечивает одновременное и равномерное повышение температуры по всему сечению однородного материала.

Эти установки обладают большими мощностями и поэтому могут создавать помехи радиоприему. Для них выделены частоты, не используемые для радиовещания, телевидения и связи: 440; 880, 1760 кГц; 5,28; 13,56; 27,12; 40,68; 81,36; 152,5; 300,0; 2375 и 22 125 МГц. Вводятся ограничения на уровень поля радиопомех — оговаривается допустимое значение его на определенном расстоянии от устройства.

Высокочастотный нагрев применяют также для сушки древесины, нагрева термореактивных пластмасс, сварки термопластов, склеивания древесины и приготовления пищи.

Интересны и другие применения высокочастотного нагрева: воздействие на покоящиеся зародыши семян, споры растений, морение куколок и сушка коконов тутового щелкопряда (если этого не делать, то бабочка прогрызет кокон и испортит шелковую нить) и, наконец, коротковолновая диатермия (индуктотермия), используемая в физиотерапевтических кабинетах при лечении многих заболеваний. Таким путем излечивают воспалительные процессы в костях, суставах, мышцах, нервах.

Среди применений индукционного нагрева важное место занимает закалка токами высокой частоты. В Ленинграде с 1947 г. в этом направлении работает институт токов высокой частоты. Закалка токами высокой частоты отличается существенной особенностью При равномерном нагреве закаливаемая сталь становится твердой и хрупкой. Чтобы сохранить вязкость сердцевины детали, с помощью токов высокой частоты закаливают лишь поверхностный слой. Поэтому закаливаемую деталь нужно нагреть очень быстро, тем более что, как правило, закаливаются ограниченные участки, а остальные части детали должны оставаться холодными. Чем тоньше слой, тем меньше время нагрева. Поэтому используют весьма большие мощности — более киловатта на квадратный сантиметр поверхности. Индуктор для закалки представляет собой 1—3 витка полой медной трубки.

Отметим, что если в круглый индуктор поместить шестерню, то быстрее и соответственно сильнее нагреваются впадины, а не вершины зубьев. Вместе с тем у расположенного поперек червячного колеса сильнее нагреваются вершины зуба. Г. И. Бабат

так объяснял это явление: «Если впадина в стальном изделии идет поперек реки вихревого тока, то магнитные силы прижимают ток ко дну впадины и здесь нагрев сильнее всего. А в выступ, перпендикулярный течению, эти токи мало распространяются. Нагрев выступа незначителен. Если же впадины и выступы в изделии находятся вдоль течения вихревых токов, то магнитные силы вынесут электронную вихревую реку на вершины выступов» [1, с. 429].

Он представлял себе и обрабатываемое изделие, и индуктор как направитель магнитного потока и говорил, что магнитные линии отклоняются поверхностью металла, как струи воды. Чтобы не делать большое число различных по форме индукторов, Г. И. Бабат предложил пользоваться достаточно большой катушкой, а в зазор между катушкой и нагреваемым изделием помещать медные разрезные кольца и шайбы, направляющие и концентрирующие магнитный поток.

9. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ РАСПЛАВЫ

На принципе асинхронного двигателя работают индукционные насосы, применяемые для перекачивания жидких металлов в металлургии и ядерной энергетике. В них обмотку ротора заменяет жидкий проводник. Поступательное движение жидкого металла или теплоносителя обеспечивается винтообразной конструкцией каналов, по которым он протекает. Этот принцип, основанный на методе Феррариса, впервые был использован в 1935 г. для приведения металлических расплавов во вращательное движение. Интенсивное перемешивание позволило получить однородную и измельченную зерновую структуру слитка. Однако перемешивание сплава после заливки в литейную форму возможно только при условии очень быстрого его разгона. Существует так называемое критическое время, за которое образуется корка — поверхностный слой отливки толщиной несколько миллиметров. Для чугуна оно равно 4—5 с. Возникшие в корке вихревые токи экранируют электромагнитное поле и оно до жидкого металла не достает.

Уже в первых опытах вращательное движение жидкого металла создавали с помощью вращающегося магнитного поля статора обычного трехфазного двигателя. Жидкий алюминий заливали в тигель, установленный в кольцевом пространстве статора.

Если интенсивное вращение расплава поддерживать до его полного затвердевания, то можно существенно уменьшить размер зерен кристаллов. При этом улучшаются механические характеристики и улучшается однородность металла.

10. МАГНИТНАЯ ПОДВЕСКА

Речь пойдет о силах, способных удержать тело в устойчивом подвешенном состоянии без каких-либо опор. Легенды о такого рода подвесках уходят в глубокую древность. Вспомним легенду о гробе пророка Магомета, который был подвешен без всяких опор.

Если силу тяжести подвешенного тела со всеми возможными нагрузками уравновесить с помощью силы, создаваемой магнитным или электромагнитным полем, то тело будет парить в пространстве,

не соприкасаясь с окружающими предметами. Работы в области такой магнитной подвески были начаты в 30-х годах применительно к ультрацентрифугам, предназначенным для получения больших скоростей вращения и измерения плотности агрессивных жидкостей. Сейчас это крупное научное направление, в котором широко используют методы автоматического регулирования. Его реализуют в аэродинамических трубах, расходомерах и плотномерах, ультрацентрифугах и вакуумных насосах.

В соглашении между СССР и США, подписанном в 1974 г., есть раздел о разработке транспорта будущего на магнитной подвеске.

Существует теория, что в стационарном электростатическом или магнитном поле подвеска тела не может быть стабильной, если относительная диэлектрическая проницаемость или относительная магнитная проницаемость тела больше или равна единице. Диэлектрическая проницаемость всех тел больше единицы. Но магнитная проницаемость диамагнитных материалов и у сверхпроводников меньше единицы. Однако практическая реализация подвески тел из таких материалов связана со значительными трудностями В 1939 г. Броунбену удалось подвешивать частицы висмута массой 8 мг и графита массой 75 мг в магнитном поле электромагнита с напряженностью 1,84 мА/м с полюсными наконечниками специальной формы. Подвеска сверхпроводящих тел была осуществлена В. К. Аркадьевым. Ему удалось заставить ферроникельалюминиевый постоянный магнит размером 4×4×10 мм и массой около 1 г парить над вогнутой поверхностью сверхпроводящего диска диаметром 40 мм, находящегося в сосуде Дьюара с жидким гелием.

Нетрудно представить себе физическую природу этого явления: любое перемещение подвешенного тела приводит к изменению вихревых токов, энергии которых достаточно, чтобы удержать на определенном расстоянии подвешенное тело. Вообще же немагнитные металлические материалы выталкиваются из зоны действия переменного электромагнитного поля в результате взаимодействия материала с полем вихревых токов, поскольку вихревые токи всегда уменьшают интенсивность магнитного поля. Таким образом пытаются подвешивать металлы для плавления их в вакууме, чтобы исключить их загрязнение от стенок тигля. Здесь подвеска сочетается с индукционным нагревом и плавлением. Одна из таких экспериментальных установок, построенных в 1952 г., имела две последовательно включенные и настроенные в резонанс катушки, питаемые переменным током от генератора звуковой частоты. Магнитные поля катушек были направлены встречно. Нижняя катушка имела форму конуса с очень большим углом у вершины. Верхняя катушка не давала расплавленному металлу выливаться. Удавалось подвешивать небольшие капли расплавленного алюминия, но серебро при плавлении в вакууме неизменно капало[10].

В другой установке при рабочей частоте 0,5 МГц удавалось подвешивать капли расплавленного галлия, индия и олова массой 4,5 г в атмосфере водорода и гелия.

11. ОБНАРУЖЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТОВ

Здесь речь пойдет об обнаружении металлических предметов, скрытых от глаз человека; они могут быть в земле, в воде и даже в теле человека.

Радиолокация решила эту проблему для металлических тел в воздухе. И здесь вихревые токи обеспечивают отражение электромагнитного импульса от металлический поверхности, необходимое, чтобы обнаружить самолет

Неметаллические включения в металлах выявляют с помощью ультразвуковых дефектоскопов Огромную работу выполняют устройства, использующие методы проникающих излучений: рентгеновское и гамма-просвечивание. С их помощью выявляют поры и плены в литье, в сложных композиционных материалах.

Излучатель современного миноискателя — рамочная антенна на длинной диэлектрической палке, являющаяся индуктивностью колебательного контура автогенератора электрических колебаний. Наличие металлического предмета в электромагнитном поле рамки изменяет частоту колебаний генератора и высота тона звукового сигнала в телефоне изменяется. На этом же принципе работают электромагнитные геологоразведочные устройства; их рамки подвешивают на самолетах или вертолетах

Электромагнитный высокочастотный каротаж скважин при бурении помогает определить насыщенность нефтеносных слоев. В этом случае важную роль играет то, что диэлектрическая проницаемость воды составляет 80, а нефти — 2,5 относительных единиц. В различных конструкциях электромагнитные поля излучают дипольные антенны или катушки индуктивности.

Разработаны различные методы, построенные на анализе амплитуды и фазы вторичного электромагнитного поля. При этом приемник обычно располагают на некотором расстоянии от источника сигнала.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ

12. ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Народное благосостояние во многом зависит от существенного повышения качества продукции. На страже качества стоят отделы технического контроля предприятий. Лучшим рабочим выдаются личные клейма.

Нужно следить за размерами изделий, чистотой обработки, отделкой, состоянием покрытий, проверять соответствие марки материала, его склонность к коррозии, правильность выполнения предписанных режимов механической и термической обработки. При этом контролируют температуру подогрева и давление при прессовании, время выдержки, температуру закалочной печи и среды для охлаждения, время переноса детали из печи в закалочную ванну при термообработке и т. д. Многие из этих контрольных операций осуществляют с помощью физических методов неразрушающих испытаний, важное место среди которых занимает метод вихревых токов. Они постепенно охватывают все области машиностроения и становятся обязательной частью контроля качества продукции и производственных проверок.

Неразрушающие методы контроля внедряются во всех промышленно развитых странах.

Обычно при контроле не только выявляют дефекты, но интересуются и другими вопросами, обеспечивающими должное качество продукции: толщиной и качеством покрытий, соответствием материала заданному в чертеже, его структурой, внутренними напряжениями и другими факторами, которые приводят к раннему появлению трещин и их росту.

Нередко план завода зависит от качества изготовления одной детали: например, в месяц нужно выпустить один ротор турбины из специальной жаропрочной стали. Только на конечную его обработку уходит 20 дней. И вот на последней операции рабочий замечает на валу ротора трещину длиной 3 мм. И это тогда, когда последняя операция по доводке поверхности ротора выполнена.

Опыт говорит, что трещины возникают в результате больших внутренних напряжений, превышающих сопротивление разрыву. Они могут появиться при механической обработке.

Проверка всех технологических операций показала, что рабочие и технолог не виноваты.

Проверили состояние дефектоскопической аппаратуры, степень подготовки работников ОТК, контрольные карты, правильность методики контроля.

Трещина вскрылась после длительной обработки... Как же проверялась деталь на различных стадиях изготовления?

Завод-поставщик выплавил заготовку в индукционных вакуумных печах с соблюдением всех норм и проверил ее с помощью ультразвукового метода. Вместе с заготовкой на машиностроительный завод поступил паспорт с указанием марки материала, прочности на разрыв, размером зерна на образце-свидетеле. Заводская лаборатория подтвердила: все показатели в норме. Перед тем как запустить заготовку в производство, она была проверена еще раз. Отступлений от принятых норм не обнаружили. Консилиум технических экспертов на машиностроительном заводе записал: «В силу физической сущности применяемого ультразвукового метода испытаний при контроле заготовки ротора с недостаточно хорошо обработанной поверхностью трещина могла быть не замечена».

На валу ротора методом вихревых токов дополнительно были выявлены мелкие трещины. После трудоемкой обработки поверхности наличие трещин подтвердил капиллярный метод. Он позволяет выявлять выходящие на поверхность, невидимые глазом поры диаметром в 2—3 мкм. Деталь окунают или поливают индикаторной жидкостью на основе нефти. Подтек жидкости легче обнаруживается, если контролируемую поверхность покрыть тонким слоем проявителя, напоминающего краску белого цвета. Этот проявитель «вытягивает» на поверхность проникшую в поры жидкость, оставляя на поверхности детали след, хорошо видимый в ультрафиолетовых лучах.

Ротор в сборку не пошел, завод плана не выполнил.

Случается, что в производстве перепутывают стали или алюминиевые сплавы различных марок. Заклепки, которые должны быть вязкими, оказываются хрупкими и твердыми. Вместо латунной детали в топливном насосе стоит бронзовая или вместо стали 45 деталь выполнена из стали 20. Тогда грозит поломка. А если деталь, изготовленная из материала другой марки, уже установ-

лена на самолете, в двигателе автомобиля или тепловоза? Тогда такая подмена грозит аварией.

Известно, что некоторые капиталистические фирмы делали такую подмену материала специально. Если выработан гарантийный ресурс, то фирма за поломку не отвечает и тут можно заработать. У нас же пропуск заведомо непригодной детали — преступление.

Наиболее опасны дефекты в неразъемных соединениях, которые часто встречаются в сложных и дорогих машинах.

Нередко причиной выхода из строя технических устройств являются усталостные трещины на деталях (рис. 3), в частности на их внутренних поверхностях, но осмотр неразъемной детали без демонтажа невозможен. Вместе с тем важно не только выявить трещину, но знать время, место ее появления, скорость распространения и, конечно, причины, вызвавшие ее возникновение и развитие.

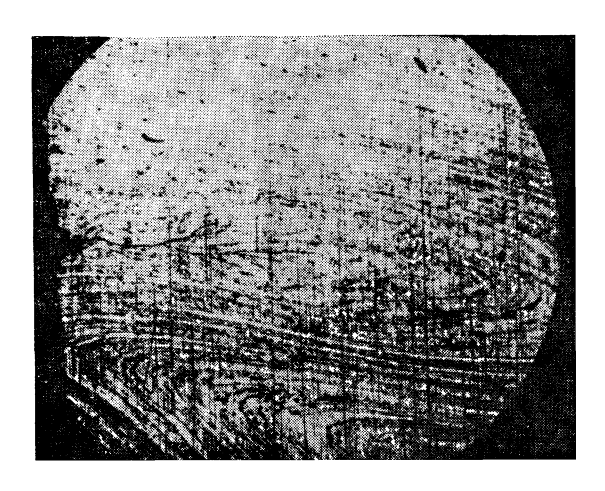


Рис. 3. Микрошлиф усталостной трещины.

Выявление дефектов, предсказание возможного разрушения материала — задача физических методов неразрушающих испытаний. В ГОСТ 18353-73 указано, что на техническом вооружении страны находятся 10 таких методов, в том числе метод вихревых токов. Широкое промышленное применение этого метода началось в 60-е годы. Оно стало насущно необходимым в условиях промышленной революции с неизбежно возникающими при этом проблемами контроля качества продукции.

За 10-летие количество и номенклатура проверяемых деталей в нашей стране утраиваются. Поэтому так важна механизация и автоматизация процессов выявления дефектов, контроля размеров и толщин стенок полых деталей при одностороннем доступе к ним. С помощью неразрушающих методов измеряют толщину покрытий и проводят структурный анализ, связанный с определением марки материала, качеством его обработки, состоянием его структуры.

По своим возможностям для измерения толщины покрытий и выявления трещин усталости метод вихревых токов опережает все другие способы неразрушающих испытаний.

13. ДЕФЕКТЫ

Бездефектным материалов не существует, но различают микродефекты и макродефекты. Микродефекты — это дефекты структуры: К ним относятся: точечные дефекты, например вакансии, которые постоянно зарождаются и исчезают под действием тепловых флуктуаций, а также атомы внедрения — избыточные атомы, проникшие в решетку, но не заполнившие ее узлов. Кроме точечных микродефектов в материале присутствуют линейные дефекты (дислокации), поверхностные наружные и внутренние дефекты.

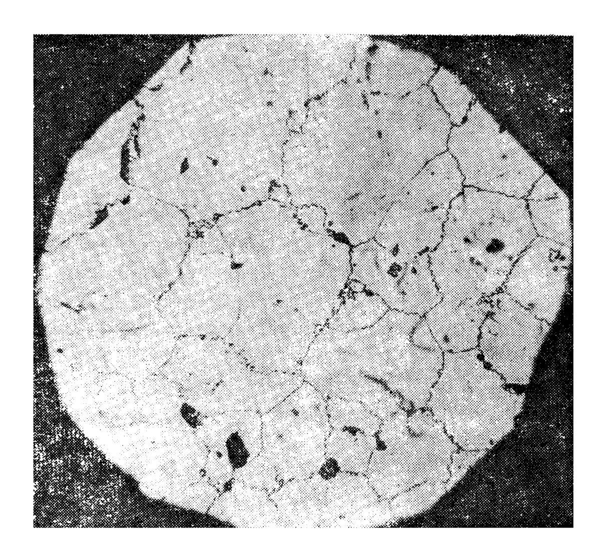


Рис. 4. Плены под микроскопом при увеличении в 200 раз.

Макродефекты — дефекты материала: опасные и не опасные поверхностные, подповерхностные или внутренние. В процессе плавки и литья возникают окисные плены (рис. 4), шлаковые включения, усадочные раковины, рыхлоты, поры. Вследствие пластической деформации в материале появляются трещины, расслоения, рванины, закаты, заковы, утяжины, флокены, волосовины. При термической и химико-термической обработке в материале возникают закалочные трещины, пузыри. Механическая обработка деталей создает шлифовочные трещины, прижоги, надиры, риски, забоины. Наконец, в процессе эксплуатации возникают усталостные трещины,

местная, общая и межкристаллитная коррозия (рис. 5). Внутренние плены при производстве труб появляются из-за нарушения процесса прошивки, при чрезмерном обжатии заготовок до встречи их с оправкой, при изменении температуры прошивки. Наиболее опасны дефекты, выходящие на поверхность детали и направленные поперек действующих нагрузок. Наружные плены и волосовины переходят с заготовки на готовые трубы. Весьма часто на трубах возникают характерные специфичные дефекты: риски, вмятины, бугры, раковины, рванины и др.

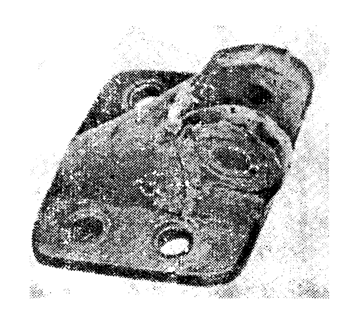


Рис. 5. Деталь, поврежденная коррозией.

Под действием механических и тепловых нагрузок металл устает. Границы зерен и кристаллов разъединяются, образуя микроскопические трещины. Трещины сливаются, и, наконец, появляется магистральная трещина. На изломе такой детали видна характерная потертость с линиями усталости

Перед дефектоскопией стоит задача выявить минимальную по размерам трещину. Задача дефектоскопического структурного анализа — предсказать возможность ее появления, выявить концентраторы напряжений.

Задача прочнистов — определить скорость развития трещин, выносливость материала и деталей Такую проверку проводят циклическим нагружением образцов с разной амплитудой и частотой. При этом изучается время жизни детали до полного разрушения, время жизни образца с трещиной, скорость распространения трещин. Начало появления трещины и ее рост наблюдают в лупу или микроскоп, определяют методом вихревых токов и ультразвуковым методом Это дает возможность найти закономерности, связанные с усталостью материалов, разрабатывать способы ее оценки на деталях, установленных в машинах. Чем раньше будет замечена трещина, тем выше безопасность эксплуатации машины, тем меньше аварий, дорожных происшествий и катастроф. Метод вихревых токов обеспечивает выявление трещин протяженностью в 2—3 и глубиной более 0,2 мм на деталях машин, находящихся в эксплуатации. Разработаны устройства для выявления дефектов глубиной 10 мкм в проволоке диаметром 0,1 мм

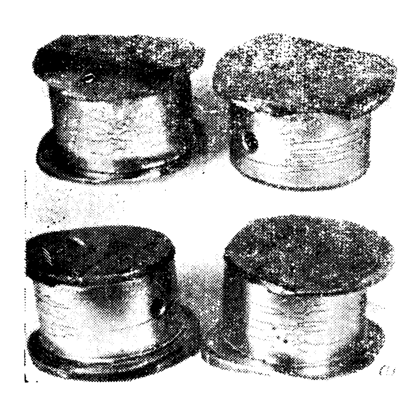
Чтобы иметь возможность выявлять очень маленькую трещину, нужно научиться ее моделировать. Простейшая модель трещины — прорезь. Ее можно сделать с помощью фрезы на станке. Такую модель используют для теоретических изысканий и экспериментов. Образцы с прорезями применяют для проверки и настройки аппаратуры.

Но для приборов, задачей которых является выявить очень маленький дефект, это не лучшая модель. Разработаны методики изготовления образцов с усталостными трещинами

Для выявления наиболее опасных поверхностных трещин используют различные методы: капиллярный, ультразвуковой, магнитный, электромагнитный.

Магнитными методами можно проверять только детали, изготовленные из магнетиков (ферромагнитных материалов). Эти методы основаны на индикации магнитных полей рассеяния, возникающих в области трещин детали, при прохождении через нее электрического тока (рис. 6).

Основой электромагнитных методов служат вихревые токи Если они текут вдоль трещины, то электромагнитное поле возму-



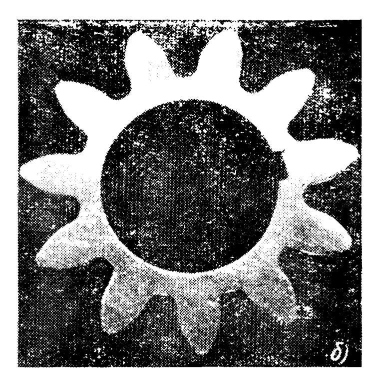


Рис. 6. Трещины, выявленные методом магнитного порошка в образцах, вырезанных из коленчатого вала (*а*), и в зубчатом колесе (*б*).

щений не испытывает. Такую трещину методом вихревых токов выявить нельзя. Если же трещина пересекает поток вихревых токов, то возникает возмущение поля и трещина выявляется. Так можно обнаружить самые опасные поверхностные трещины в металлических материалах. При этом неважно, окрашена ли деталь, видна или не видна трещина. В борьбе между различными методами неразрушающего контроля этот факт немаловажен, так как при применении капиллярного метода и метода магнитного порошка очертания трещины нужно увидеть. При контроле методом вихревых токов сигнал о трещине может быть звуковым, световым. Наличие трещины регистрируют микроамперметром, самописцем, дефектоотметчиком.

14. ИЗ ИСТОРИИ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Д. Е. Хьюз в 1879 г. рассказал об опыте по использованию электромагнитного метода для различных контрольных операций. В качестве генератора он использовал маятник часов, индикатором служили телефонные трубки.

В 1905 г. будущий академик А. Н. Крылов построил электромагнитные весы для контроля орудийных стволов.

Во время первой мировой войны и после нее во многих странах были выданы патенты на электромагнитные приборы и установки для контроля рельсов, колес и валов железнодорожных вагонов.

В Советском Союзе первые низкочастотные электромагнитные дефектоскопы, использующие метод вихревых токов, появились до Отечественной войны. В Томске работала группа ученых, развивавшая теорию метода вихревых токов применительно к контролю рельсов. После войны стали неизвестны электромагнитные контрольные устройства, разработанные Н. М. Старобинским.

15. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромагнитные дефектоскопы, структуроскопы, толщиномеры, измерители линейных размеров и виброметры объединяются наличием в них устройств для передачи и приема информации,

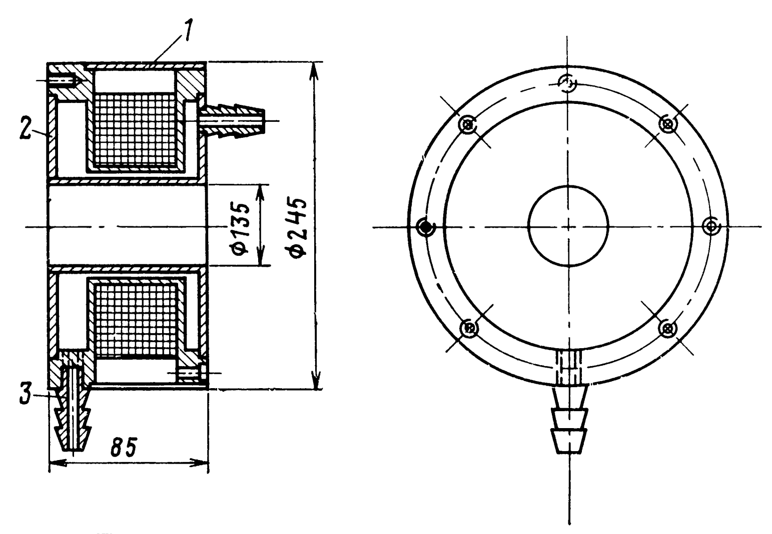


Рис. 7. Проходной датчик с водяным охлаждением.

1 — наружное кольцо; 2 — корпус; 3 — штуцера для подключения гибких шлангов.

часто совмещенных в один узел. Возбудителями и приемниками электромагнитных полей в ближней, локальной зоне служат катушки индуктивности. Выполняя роль передающей и приемной антенн, они являются основой датчиков любого электромагнитного прибора, построенного на принципе вихревых токов (в настоящее время вместо термина «датчик» используется термин «преобразователь»).

Если контролируемая деталь помещается внутрь катушки датчика, его называют проходным (рис. 7). Катушку в оправке можно погрузить в жидкость, тогда датчик называют погружным. Если катушка датчика накладывается торцом на деталь, датчик называют накладным. Накладными называют и датчики, выполненные по принципу магнитофонных головок. Главной их частью является магнитопровод со щелью.

Проходные датчики используют для выявления продольных трещин в прутках, трубах и проволоке. Когда образец с трещи-

нами помещен в катушку, ее параметры (сопротивление и индуктивность либо э. д. с. самоиндукции) изменяются по сравнению с теми, которые были в случае бездефектного образца. По изменениям параметров судят о наличии дефектов в образце. Для удобства измерений обычно сравнивают параметры двух катушек, в одной из которых помещаются детали, подлежащие контролю, а в другую — деталь, принятая за эталонную.

Разработаны проходные датчики для контроля проволоки с катушками диаметром меньше миллиметра. В нашей стране используют и тяжелые датчики с водяным охлаждением диаметром 300—500 мм. Такие датчики устанавливают на специальных фундаментах и переносят с помощью тали.

Накладными системами ведется поиск поверхностных и подповерхностных трещин любой ориентации.

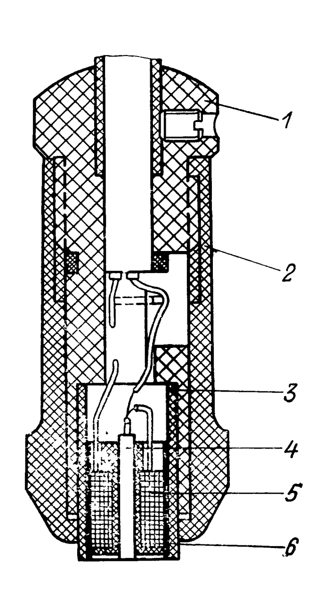


Рис. 8. Накладной датчик.

1 — корпус; *2* — наконечник; *3* — втулка; *4* — стрежень ферритовый; *5* — катушка; *6* — пермаллой.

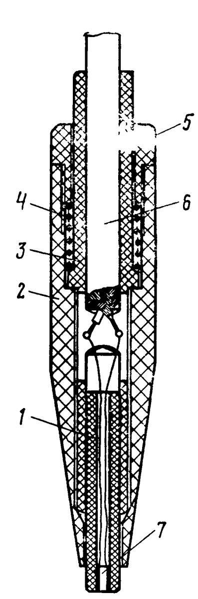


Рис. 9. Накладной карандашный датчик.

1 — керамическая втулка; *2* — оправка; *3* — резиновая втулка; *4* — пружина; *5* — крышка; *6* — кабель; *7* — катушка с ферритовым сердечником.

Обычно в комплект дефектоскопа входит несколько датчиков различной конструкции. Накладной датчик и датчик карандашного типа показаны на рис. 8 и 9. Длина датчика карандашного типа 60 мм. Миниатюрные датчики позволяют проверять узкие полости или отверстия диаметром 5—7 мм. Самые маленькие датчики в выпускаемых промышленностью дефектоскопах выполнены

на ферритовых цилиндрических сердечниках диаметром 0,3—0,5 мм. Катушку наматывают непосредственно на сердечник на расстоянии 0,8—1,2 мм от его края, заточенного под полусферу.

Без ферритового сердечника невозможно построить современный дефектоскопический прибор. С его помощью обеспечивают высокую добротность катушек. К сожалению, ферриты чувствительны к нагреву. Поэтому приходится думать о термокомпенсации. Весьма удачным является вариант термокомпенсации, при которой измерительная и компенсационная катушки размещаются с разных сторон одного и того же ферритового стержня. Кроме ферритов в качестве сердечников используются альсиферы, карбонильные сердечники. Главная задача при изготовлении датчиков — обеспечить оптимальную чувствительность системы, выдержать индуктивность и добротность катушки. Иногда приходится накладную катушку помещать в трубчатый или конусный ферритовый концентратор, карбонильный сердечник, обматывать катушку в два-три слоя пермаллоевой лентой (при работе на частотах до 100 кГц). В этом случае между соседними слоями ленты помещают изоляционную прокладку, которая препятствует образованию вихревых токов. Для уменьшения истирания катушку помещают в керамическую или капроновую оправки, вклеивают стальные шарики, агатовые или рубиновые наконечники. Разработаны вытянутые в длину линейные датчики, датчики, намотанные на ферритовый шар (изменения угла наклона такому датчику не страшны), датчики, в которых ширина магнитного потока в щели ферритового кольца изменяется и выпучивается по нужному для исследователя закону.

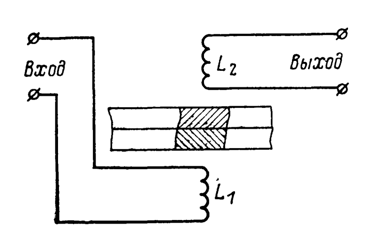


Рис. 10. Схема экранного датчика, используемого для контроля качества точечной сварки.

Принято говорить о пороге чувствительности прибора к контролируемому параметру. Для дефектоскопов—это протяженность, раскрытие и глубина трещин. Проще говорить о пороге чувствительности к протяженности глубоких усталостных трещин — трещин, возникающих из-за усталости материала детали, например при ее длительной работе. При этом понимают еще надежно выявляемую трещину определенной минимальной длины. Эта характеристика в первую очередь определяется конструкцией катушки датчика. Под накладным датчиком с катушкой прямоугольного сечения течет замкнутая река вихревых токов. Наличие на ее пути плотины в виде изоляционной прокладки или глубокой риски (на порядок большей, чем глубина проникания) — полная преграда этой реке, правда, до тех пор, пока емкостное сопротивление, образованное стенками трещины или риски, не станет соизмеримым с внутренней индуктивностью кольца вихревых токов. Небольшие препятствия эта река огибает без возмущений. Средний диаметр кольца вихревых токов под таким датчиком в контролируемом металле практически совпадает с его внешним диаметром. Риска или, лучше, трещина надежно выявляется, если она рассекает это кольцо. Порог чувствительности, т. е. минимальная длина, выяв-

ляемой трещины для дефектоскопа с накладной катушкой определяется размерами последней, в первую очередь ее диаметром. Обычно он составляет половину внешнего диаметра катушки.

При выявлении небольших трещин требуется минимальный по размерам датчик. Но при этом контур вихревых токов становится малым и такой датчик оказывается малочувствительным. Индуктивность катушки такого датчика (без сердечника) в большой степени будет зависеть от высоты ее намотки. В датчиках с достаточно длинными катушками без сердечников верхние витки участия в создании вихревых токов не принимают. Ферритовые сердечники позволяют уменьшить действующую высоту намотки и поля рассеяния.

Датчики с одной обмоткой называют однокатушечными. Иногда необходим датчик с двумя обмотками: возбуждающей и измерительной. Такой датчик называют трансформаторным. Обычно его катушки наматывают одна на одну или помещают очень близко, рядом. Но можно возбуждающую и измерительные обмотки разнести, а контролируемую деталь поместить между ними (рис. 10). Эти датчики называют экранными, так как контролируемый материал экранирует возбуждающую катушку от измерительной. Пытались строить и экранные проходные датчики. Теория взаимодействия таких датчиков со стенкой металлической трубы разработана [4].

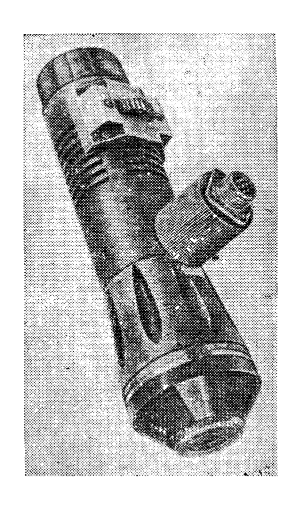


Рис. 11. Датчик модуляционного дефектоскопа с вращающимися катушками.

Если сигнал о наличии трещины поступает и при неподвижно расположенном над трещиной датчике, то такую установку (прибор) называют статической. Иначе, мы имеем дело с динамическими или модуляционными дефектоскопами, характерной особенностью которых является относительное перемещение датчика и контролируемой детали. С помощью этих приборов наиболее просто проверять цилиндрические детали, проволоку, прутки и трубы. Используют также накладные вращающиеся датчики, пригодные для контроля больших ровных поверхностей (рис. 11).

16. О РАСЧЕТАХ

Катушки индуктивности — основные элементы приборов, характеризуются активным R_0 и индуктивным ωL_0 сопротивлением. Вследствие поверхностного эффекта активное сопротивление при питании катушки переменным током зависит от диаметра провода, способа намотки и частоты питающего тока.

Расчет катушек различной конфигурации подробно излагается в работах [24; 25; 26]. Установка на немагнитный металл катушки, питаемой переменным током, приводит, по меньшей мере, к двум явлениям: часть энергии «отсасывается» металлом и выделяется в

форме потерь на тепло, другая часть энергии отражается от поверхности металла, уменьшая индуктивное сопротивление катушки, т. е. ее индуктивность. При установке катушки на магнитный металл, кроме того, наблюдается увеличение индуктивности катушки из-за уменьшения магнитного сопротивления. Суммарное действие этих факторов приводит к резкому возрастанию активных потерь и некоторому, часто незначительному, изменению индуктивности.

Эти изменения характеризуются значением вносимых активного и индуктивного сопротивлений. Эквивалентная схема катушки, взаимодействующей с металлом, изображается в виде двух последовательно включенных собственного и вносимого металлом активных и индуктивных сопротивлений $R_0+R_{вн}$ и $\omega L_0-\omega L_{вн}$ (рис. 12). По мере увеличения частоты питающего тока эту эквивалентную схему приходится усложнять, вводя в нее дополнительные емкости и индуктивности, характеризующие межвитковую емкость и эффект близости. Для анализа весьма важен характер изменений вносимых сопротивлений под действием различных факторов, в первую очередь электрической проводимости контролируемого металла и частоты питающего тока. При изменении электрической проводимости немагнитных металлов от нуля до бесконечности вносимое индуктивное сопротивление изменяется от нуля до некоторого постоянного значения. При испытаниях ферромагнитных материалов знак вносимого сопротивления зависит от частоты. На низких частотах относительное вносимое индуктивное сопротивление положительно, а на высоких — отрицательно.

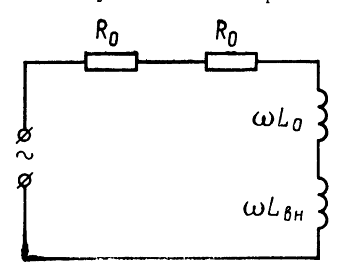


Рис. 12. Эквивалентная схема взаимодействия катушки с металлом.

Если испытывать немагнитные металлы с разной удельной электрической проводимостью на одной частоте, то вносимое сопротивление в комплексной плоскости будет изменяться по кривой, близкой к дуге окружности. Хордой этой дуги служит максимальное значение вносимого индуктивного сопротивления, соответствующее испытаниям металла с бесконечно большой электрической проводимостью. Если напряжение на возбуждающей катушке остается неизменным, то по закону изменения комплексного сопротивления изменяется и ток, а следовательно, и э. д. с. измерительной обмотки.

Обычно в основе расчета катушки датчика лежит взаимодействие витка с металлом Если катушку использовать как в качестве проходной, так и накладной, то основные зависимости в комплексной плоскости будут отличаться лишь некоторым масштабным коэффициентом. Таким коэффициентом может служить предельное отношение индуктивного сопротивления катушки, установленной на немагнитном металле с бесконечно большой удельной электрической проводимостью и магнитной проницаемостью, равной единице, к холостому значению индуктивного сопротивления:

$$\gamma_{\sigma\to\infty}=\frac{\omega L_{\sigma\to\infty}}{\omega L_0}.$$

Изменения активного сопротивления в цепи катушки в этом случае будем считать равными нулю. Значение вносимой индуктивности

$$L_{bн} = k_1^2 L_0.$$

Отсюда

$$k^2{}_1 = \frac{L_0 - L_{вн}}{L_0} = 1 - \gamma.$$

Коэффициент γ характеризует часть магнитного потока, не сцепленного с контролируемым металлом, и поэтому называется коэффициентом рассеяния.

В пределе $\gamma_{\sigma\to\infty} = 1 - k^2{}_{\sigma\to\infty}$.

Коэффициент рассеяния катушек без сердечников зависит от размеров, плотности намотки и диаметра провода катушки, а для катушки с сердечником и от катушечной магнитной проницаемости. Для проходной катушки, имеющей форму соленоида,

$$\gamma_{\sigma\to\infty} = 1 - a^2/D^2{}_{ср},$$

где a — диаметр контролируемого прутка; $D_{ср}$ — средний диаметр катушки.

17. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

При создании и разработке дефектоскопических устройств широко используют стенды, составленные из типовых генераторов сигналов, измерительных усилителей, фазометров, измерителей добротности и индуктивности, мостов переменного тока, вольтметров, осциллографов и самописцев. Но создать прибор — это не просто скопировать стенд. По мере уменьшения размеров прибора в силу вступают новые условия, связанные с наводками, необходимостью создания малогабаритных блоков питания, способами настройки, регулировки и измерений. Изучение таких схем

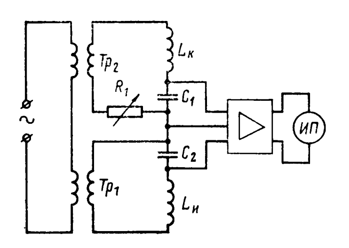


Рис. 13. Схема прибора с датчиками, включенными в резонансную цепь.

$L_к$ — компенсационная катушка датчика; $L_и$ — измерительная катушка датчика.

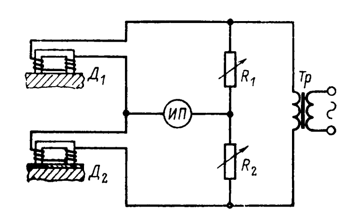


Рис. 14. Мостовая схема измерений.

удобно начать с выяснения способов включения катушек-датчиков. Однокатушечные или параметрические датчики включают в резонансную цепь (рис. 13) или мостовую схему (рис. 14), а двухкатушечные (трансформаторные) датчики — в компенсационные дифференциальные схемы (рис. 15, *а*, *б*).

К резонансу в цепи, как известно, можно подойти различными путями: изменять индуктивность или емкость, изменяя частоту собственных колебаний. Оба эти способа реализуются и в дефектоскопических устройствах.

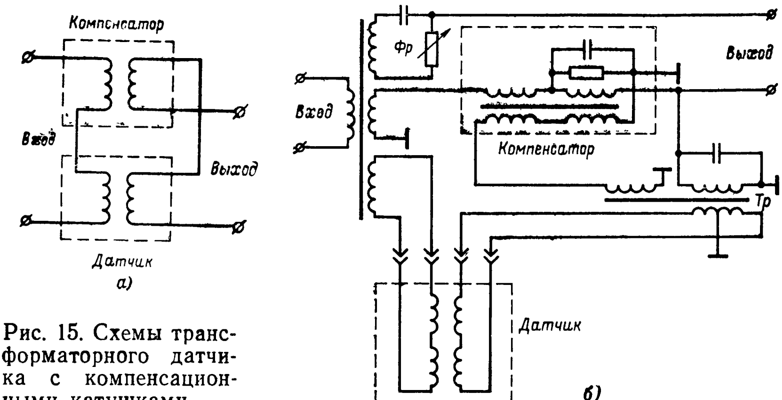


Рис. 15. Схемы трансформаторного датчика с компенсационными катушками.

Взаимодействие датчика и металла приводит к изменению индуктивного сопротивления, при этом изменяется собственная частота колебательного контура. Эти изменения можно оценить по изменению емкости переменного конденсатора, который подключают к контуру для настройки его в резонанс, либо по показаниям вольтметра, измеряющего напряжение на катушке, включенной в последовательный резонансный контур.

Весьма удобным оказывается включение датчика в колебательный контур автогенератора. При этом уход резонансной частоты фиксируется по изменению частоты автогенератора.

Классическая схема моста переменного тока может содержать две одинаковые катушки и два резистора. Два плеча моста образуют катушки датчиков $Д_1$ и $Д_2$ (рис. 14). При равенстве произведений сопротивлений противоположных плеч через измерительный прибор ИП, включенный в диагональ моста, ток не течет. Нарушение этого равенства измерительный прибор фиксирует. С помощью мостовой схемы измеряют вносимые сопротивления.

В компенсационных или дифференциальных схемах главной задачей является начальная компенсация напряжения на катушке. Наиболее просто этого можно достичь встречным включением компенсационных измерительных обмоток трансформаторных датчиков (рис. 15). Так была выполнена первая построенная Хьюзом контрольно-измерительная схема. Он назвал ее индукционной уравновешенной схемой.

Но так как две строго одинаковые катушки изготовить сложно, то такие схемы содержат дополнительные компенсаторы амплитуды и фазы сигналов. Иногда эту роль выполняют перемещающиеся ферритовые стержни, установленные на резьбе в компенсационной катушке.

Структурная схема прибора определяется его назначением. Для дефектоскопов, структуроскопов, толщиномеров важна чувствительность к контролируемому параметру, степень подавления мешающих измерениям факторов, а их при контроле методом вихревых токов немало. У дефектоскопов, структуроскопов, измерителей толщины с накладными датчиками на полезный сигнал влияют изменения зазора между датчиком и металлом. Уменьшить влияние зазора — одна из главных задач разработчика этих приборов. Зазор — это и неплотная установка датчика из-за наличия смазки, шероховатости поверхности, ее кривизны, и различная толщина диэлектрических покрытий при проверке качества деталей, и люфт токарного станка, если датчик устанавливается в его суппорте.

Еще Хьюз говорил о возможности с помощью компенсационной схемы обнаружить миллиграмм меди или железную проволоку тоньше человеческого волоса, определить разницу температур обычной монеты и монеты после простого потирания ее пальцами рук. Прибор Хьюза реагировал на изменения температуры, электрических и магнитных свойств объекта контроля. Но многообразие влияющих факторов — это и причина огромных трудностей при внедрении метода контроля, использующего вихревые токи.

Первый серьезный шаг в поисках электрическим путем уменьшить влияние не подлежащих исследованию параметров, в частности зазора, был сделан в конце второй мировой войны.

В результате был разработан метод анализа сигналов, который благодаря использованию фазовых соотношений позволил уменьшить влияние изменений зазора на показания приборов. Успехи в создании таких приборов дали возможность Ф. Ферстеру создать после войны в Западной Германии институт по разработке электромагнитных дефектоскопических приборов, с которыми теперь знакомы многие промышленно развитые страны.

Электромагнитные приборы, выполненные по фазочувствительным схемам, работают при хорошо скомпенсированных однотипных трансформаторных датчиках. В дифференциальной схеме зазор на фазу сигнала влияния не оказывает. Это объясняется тем, что при изменении зазора какие-либо факторы, изменяющие скорость перемещения фронта электромагнитной волны, отсутствуют. Дифференциальная компенсационная схема позволяет это явление наблюдать без искажающего влияния изменения сигнала в измерительных цепях. Можно измерить и фазовый сдвиг сигнала на катушке, включенной в колебательный контур, но при этом нужно учитывать фазовую характеристику резонансного контура. Для измерения фазы сигнала применяются фазочувствительные выпрямители или усилители. На фазочувствительный выпрямитель (рис. 16) измеряемое напряжение $U_и$ поступает через трансформатор Tp_1. В одной половине вторичной обмотки трансформатора Tp_2 опорное напряжение $U_{оп}$ добавляется к этому напряжению, а в другой половине вычитается из него. Суммарный ток выпрямляется с помощью диодов. На нагрузке, представляющей собой последовательное соединение резисторов R_1 и R_2 выделяется напряжение

$$U_0 = kU \cos \Psi,$$

где k — коэффициент, зависящий от выбранного режима работы схемы; Ψ — угол фазового сдвига между опорным и измеряемым напряжениями.

Независимо от величины измеряемого напряжения выпрямленное напряжение остается равным нулю до тех пор, пока фаза подаваемого на вход напряжения отличается от фазы опорного на 90°. Резонансный и фазовый способы измерения относятся к двухпараметровым, т. е. к таким, которые позволяют измерять один параметр с отстройкой от другого, а при наличии двух каналов проводить раздельное измерение каждого из двух влияющих параметров.

Рис. 16. Схема фазочувствительного выпрямителя.

Однако обычно факторов, влияющих на показания приборов, больше двух. Поэтому разрабатываются многопараметровые способы измерения. В 1959 г. С. Л. Шифман предложил использовать схему попарного суммирования сигналов, позволяющую последовательно исключать каждый из факторов, мешающих измерениям. Была сделана попытка решить задачу с помощью теории информации, допустив, что все влияющие на катушку факторы изменяются в незначительных пределах. При этом выходной сигнал ΔU_f на частоте f можно представить в виде следующего уравнения:

$$\Delta U_f = a_{k1}\Delta\mu + a_{k2}\Delta\sigma + a_{k3}\Delta h + a_{kn}\Delta x,$$

где $\Delta\mu$, $\Delta\sigma$, Δh — изменения магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости, зазора; Δx—изменения какого-либо другого параметра; a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}, a_{kn} — постоянные коэффициенты пропорциональности

Полагали, что эти коэффициенты можно найти экспериментально, задаваясь небольшими изменениями интересующего параметра. Записывая таким же способом выходной сигнал на нескольких частотах, получают систему уравнений для определения величин $\Delta\sigma$, $\Delta\mu$, Δh и т. д. Простое схемное решение получается при двух изменяющихся параметрах — зазоре и толщине измеряемого листа. В этом случае одна из частот (низкая) используется, например, для измерения толщины, а другая (высокая) — для компенсации влияния изменения расстояния между датчиком и деталью.

Рабочие частоты выбираются с таким расчетом, чтобы глубина проникновения в металл электромагнитной волны высокой частоты была значительно меньше толщины детали, а низкочастотной — заведомо больше толщины. Усиленное и выпрямленное напряжение подается на вход измерительного тракта. Напряжением высокой частоты, зависящим только от зазора, управляют усилителем измерительного тракта.

Более сложен двухчастотный амплитудно-фазовый способ. Такой метод можно реализовать, например, в толщиномерах с целью одновременной отстройки от влияний зазора и изменений удельной электрической проводимости материала контролируемой детали. Как и предыдущий способ, он содержит два канала: низкочастотный (измерительный) и высокочастотный (компенсационный). На величину

напряжения низкочастотного канала влияют изменения электрической проводимости, толщины детали и зазора между деталью и датчиком. На показания высокочастотного — изменения этого зазора и электрической проводимости. Отстройка от влияния на показания индикаторов в каждом канале осуществляется с помощью амплитудно-фазового способа. Благодаря этому на показания измерительного канала влияют изменения толщины изделия и его электрической проводимости, а на показания компенсационного — только изменения электрической проводимости. Напряжения с обоих каналов подаются на вычитающий блок, с выхода которого снимается напряжение, пропорциональное контролируемой толщине. Были разработаны способы уменьшения влияния зазора с помощью систем следящего типа. При изменении зазора на выходе следящей системы возникает напряжение рассогласования, полярность которого зависит от направления перемещения изделия относительно датчика. Это напряжение приводит в движение электродинамический механизм, который перемещает датчик, поддерживая расстояние между ним и изделием неизменным. Однако такие системы инерционны и сложны в эксплуатации.

Часто встречаются и другие случаи многопараметрового контроля. Во многих случаях структура и химический состав контролируемой детали неоднородны. Так, при изготовлении труб из нержавеющих немагнитных сталей на станах холодной прокатки структурные изменения материала возникают из-за неодинаковой пластической деформации. В ряде случаев детали специально наклепывают. Влияние наклепа зависит от степени деформации. При изготовлении труб самое сильное изменение магнитных свойств наблюдается после первого обжатия. При измерении линейных размеров, толщины изоляционных покрытий одним из весьма действенных средств уменьшения влияния структурной неоднородности является увеличение частоты питающего тока.

Деформация деталей из нержавеющих немагнитных сталей приводит к выделению магнитной α-фазы. Ее величина на различных участках детали неодинакова, что делает контроль (например, измерение толщины стенок) очень сложным. Весьма действенным является отжиг этих деталей при температурах на 100—150°С выше температуры рекристаллизации, однако такой метод не всегда возможен по технологическим соображениям. Более безобидным является подмагничивание детали достаточно мощными магнитными полями. Уже в полях 50—56 кА/м неравномерное распределение α-фазы не сказывается на показаниях. В этом случае катушки датчика располагают внутри магнитопровода. Понятно, столь мощные поля не нужны для подмагничивания деталей из простых конструкционных и даже легированных сталей. Уже в полях 400—800 А/м влияние изменений магнитной проницаемости на показания индукционных приборов значительно ослабляется.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ВЫЯВЛЕНИЕ ТРЕЩИН

18. ОСОБЕННОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

На современном машиностроительном заводе есть рентгеновские и физические лаборатории, большие участки капиллярной дефектоскопии и участки магнитного контроля. Методами проникающих излучений, к которым относится и рентген, выявляют глубинные дефекты, возникающие в процессе плавки и литья. На помощь рентгену пришел ультразвук. Удельный вес ультразвукового (акустического) контроля все возрастает. Ему по плечу не только глубинные, внутренние, но и поверхностные дефекты, возникающие в процессе пластической деформации, химической, химико-термической и механической обработки. Тонкие поверхностные дефекты — шлифовочные трещины, волосовины—выявляются методом магнитного порошка и капиллярными методами.

Для контроля деталей машины в полевых условиях, на улице громоздкая аппаратура не может быть использована. При эксплуатации машины в материале деталей возникают усталостные трещины, местная, общая и межкристаллитная коррозия. Чтобы выявить эти дефекты, нужно регулярно проверять узлы с помощью легких переносных приборов. Сложности возрастают из-за наличия краски и загрязнений контролируемой поверхности.

В этих условиях весьма удобен метод вихревых токов. Он пригоден для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов. Конечно, чувствительность и разрешающая способность метода в значительной степени зависят от места расположения и происхождения дефекта, его протяженности, ширины раскрытия, глубины и т. д. Выявляются только такие дефекты, которые существенно изменяют контур вихревых токов, что возможно лишь в том случае, если электрический контакт между стенками дефекта нарушен. Этот вопрос не так прост.

Томская школа ученых, возглавляемая А. Б. Сапожниковым, исследовала выявляемость продольной прорези. В 1947 г. А. А. Ботаки, изучив влияние дефекта на магнитный поток в объекте контроля, изготовленного в виде цилиндрического прутка, нашел оптимальную частоту питания датчика, при которой появление дефекта вызывает наибольшее изменение магнитного потока:

$$f_{\text{опт}} = \frac{5{,}6\cdot 10^7}{\mu\sigma R^2},$$

где μ — магнитная проницаемость; σ — удельная электрическая проводимость; R — радиус прутка.

Для постоянного тока трещина в образце — разрыв. Ток прекращается или течет по той части образца, где трещины нет. Этот эффект сродни увеличению удельного сопротивления на участке с трещиной.

При использовании переменных вихревых токов приходится учитыват зазор между датчиком и металлом. Риска в образце под накладным датчиком удельного сопротивления не увеличивает, но увеличивает зазор. Трещина **в этом же образце на достаточно вы-**

сокой частоте проявляет себя двояко: и увеличением сопротивления, и увеличением зазора. Поэтому говорят, что направления годографов, характеризующих влияние трещин в комплексной плоскости, отличается от влияния изменений электропроводности*. Эти годографы лежат между линиями влияния зазора и электропроводности.

Чем больше раскрытие дефекта, тем эффект влияния трещины ближе к эффекту влияния зазора. Поэтому при амплитудно-фазовом методе измерений при отстройке от зазора лучше выявляются узкие трещины с небольшим углом раскрытия, чем широкие риски. Для выявления дефектов в прутках, проволоке и трубах применяются компенсационные (дифференциальные) и мостовые схемы. Причем для компенсации, как правило, используется соседняя часть контролируемого объекта. Такие схемы использовались в первых промышленных дефектоскопах.

Современные электромагнитные дефектоскопы принято делить на статические и динамические. Статические дефектоскопы не имеют устройств по анализу спектра сигнала, возникающего при быстром перемещении датчика относительно трещины. В 50-х годах институтом Ф. Ферстера для контроля проволоки, прутков и труб была разработана группа статических дефектоскопов с проходными датчиками, в которых для регистрации показаний использовались амплитудно-фазовые методы эллипса, синусоиды, световой точки. Многолетний опыт применения этих приборов показал, что статические приборы с электронно-лучевой трубкой, использующие методы эллипса, световой точки или синусоиды, весьма просто отстроить от влияния изменений наружного диаметра (на 5—10%) контролируемых прутков. Но при контроле труб даже небольшие изменения наружного диаметра вызывают значительные изменения толщины стенки трубы, что несмотря на отстройку влечет появление сигнала на экране прибора. Сигнал, вызванный небольшим изменением диаметра трубы, оказывается большим, чем сигнал от дефекта Приборы, отстраивающиеся только от одного из мешающих факторов, при контроле труб или ферромагнитных прутков не имеют особых преимуществ перед другими приборами, совсем не имеющими отстройки. Поэтому возникла идея динамического контроля.

При быстром многократном пересечении датчиком несплошности возникает модуляционный эффект, названный так Р. Хохшильдом из-за аналогии с модуляцией, когда на несущую частоту накладывается низкая частота. Детектирование и выделение огибающей или низкочастотной составляющей позволяет «увидеть» сигналы от дефектов небольшой протяженности и даже от отверстий диаметром 0,4—0,5 мм, так как для анализа сигнала применяется большой арсенал средств, используемых для этой цели в радиотехнике.

Совершенствование статических приборов с проходной катушкой и разработка модуляционного способа испытаний привели к созданию дефектоскопов, обеспечивающих выявление дефектов в трубах, прутках круглого и шестигранного профиля. В ФРГ эти приборы называются Циркограф, Дефектограф, Дефектомат, Дефектотерм, Магнатест. Прибор Циркограф имеет четыре вращающихся накладных датчика. Скорость подачи прутка изменяется в пределах 0,15—2,0 м/с и зависит от выбранного диапазона измерений. При-

---

* Годографом называют путь, который пробегает конец вектора. В данном случае перемещается конец линии комплексного сопротивления катушки.

боры обеспечивают контроль прутков диаметром от 2 до 130 мм. Имеется вращающаяся головка, предназначенная для контроля внутренней поверхности, устройство для цветной маркировки дефектов и аппарат для обработки результатов проверки. Разработан специализированный вариант прибора, предназначенный для работы совместно с бесцентровым шлифовальным станком. Дефектограф используют для автоматизированной проверки проволоки, прутков и труб со стенками толщиной до 4 мм. Испытательные частоты — от 2 до 10 кГц. Датчики проходного типа. Скорость подачи 1—4 м/с. Приборы снабжены самописцами, устройствами для обработки результатов и цветной маркировки дефектов.

Дефектомат — дальнейшая модернизация Дефектографа — может работать на частотах 200 Гц, 2,5 и 10 кГц или на 30 и 90 кГц. Скорость контроля от 8 мм/с до 5 м/с.

Дефектотермом контролируют горячую проволоку и трубы с очень большой скоростью. Прибор укомплектовывают блоками цифровой регистрации и статистического учета дефектов. Для этих приборов выпускается устройство для размагничивания деталей после контроля.

Для контроля качества сварных труб диаметром 57—600 мм применяют Дискомат — прибор, использующий методы вихревых токов и индикации полей рассеяния. Скорость контроля до 1 м/с. Прибор снабжен устройствами для цветной маркировки дефектных участков, самписцем, блоком обработки результатов проверки.

В Советской Союзе близкие по типу разработки осуществляются во ВНИИНК (г. Кишинев) и НИИ интроскопии (НИИИН, г. Москва).

Масса аппаратурной стойки прибора ВД-30П 120 кг, а блока датчиков — 100 кг. Это устройство работает на частоте 16 кГц, имеет блок подмагничивания и обеспечивает выявление трещин длиной 2 мм. Скорость перемещения прутка через датчик дефектоскопа достигает 2 м/с. Автоматические сигнализаторы обеспечивают сортировку прутков на годные и бракованные.

На одном из серийных предприятий из всего количества забракованной продукции с помощью дефектоскопа Магнатест-Д было выявлено 70% прутков с трещинами глубиной до 0,2 мм. При контроле прутков, используемых для изготовления нормалей, в отдельные месяцы отбраковывается до 11—14% всего поступающего материала.

Недопустимыми дефектами прутков и труб из нержавеющих сталей являются закаты, подрезы, раковины, выточки, плохая обработка поверхностей. При контроле этих полуфабрикатов отбраковывается до 7—10% проверяемой продукции. По форме и наклону эллипса на экране прибора удается ориентировочно определить характер дефекта. Высота проекции эллипса на вертикальную ось примерно соответствует глубине трещин в прутке, расположенных перпендикулярно к поверхности. Трещина (нарушения сплошности), не выходящие на поверхность, дают эллипс, расположенный горизонтально. Грубая шлифовка, поперечные риски глубиной до 0,2 мм приборами с проходной катушкой выявляются плохо. При контроле нагартованных термообработанных материалов на показания сильно влияет магнитная α-фаза, которая, как правило, расположена по длине прутков неравномерно. Дефекты глубиной 10—15% толщины стенки, расположенные на внутренней поверхности труб, выявляются внутренними проходными датчиками. Серьезные трудности воз-

никают, если контролируемая поверхность имеет задиры и налипы. Была сделана попытка контролировать более сложные профили, например лонжероны лопастей вертолетов. Заготовки лонжеронов прессуют из двух половин, и поэтому возможно появление расслоения продольного шва. Опытная индукционная установка помимо механического протягивающего устройства включала проходные наружные и внутренние датчики, выполненные по форме профиля лонжерона. Для испытаний использовался прибор, работавший на частоте 10 кГц с индикацией сигнала по методу эллипса. В носике лонжерона удавалось выявить дефекты раскрытием 0,005 мкм, глубиной около 1 мм, протяженностью более 4 мм.

19. ВЫЯВЛЕНИЕ ТРЕЩИН С ПОМОЩЬЮ НАКЛАДНЫХ ДАТЧИКОВ

Методом вихревых токов выявляют только дефекты, пересекающие траекторию этих токов. Показания прибора зависят от глубины, протяженности и раскрытия трещин. Чем шире раскрытие дефекта, тем эффект от влияния трещины ближе к эффекту от влияния зазора. Для накладных датчиков на комплексной плоскости вносимых сопротивлений прорезь и усталостная трещина всегда дают составляющую, совпадающую с направлением эффекта, вызванного ухудшением электрической проводимости контролируемого материала, а также составляющую, совпадающую с направлением линии зазора.

При экспериментах по выявлению дефектов с помощью накладных датчиков используют искусственные прорези, стыки, трещины. Разработана методика получения усталостных трещин на образцах с помощью механического резонансного вибратора: в образце делается надрез, который после создания трещины сошлифовывается. О глубине трещины судят по протяженности утяжины на боковой поверхности образца. С помощью прорезей можно имитировать сквозную, подповерхностную трещину, а также трещину, выходящую на поверхность с противоположной стороны образца, и поверхностную трещину ограниченной глубины (т. е. такую, под которой имеется толстый слой сплошного металла).

Если включить датчик в диагональ мостовой схемы и исследовать чувствительность к глубине залегания подповерхностной достаточно глубокой трещины, то оказывается, что чувствительность максимальна на частотах 7—10 кГц. Чем толще верхний слой металла, тем эта частота ниже.

При использовании очень высоких рабочих частот, вследствие поверхностного эффекта чувствительность прибора к весьма малым поверхностным трещинам существенно возрастает. Для экспериментов используют измерители амплитудно-частотных характеристик с качающейся частотой. По их показаниям определяют добротность контура, в который включен датчик. Эти эксперименты показывают, что наличие трещины в металле при испытаниях на высоких частотах всегда сопровождается увеличением активных потерь. При испытаниях стальных деталей таким способом добротность катушки из-за больших потерь на вихревые токи очень низка.

Значение потерь связано с раскрытием трещин, т. е. со значением электрического сопротивления из-за наличия электрических контактов по стенкам трещины.

20. СТАТИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ С НАКЛАДНОЙ КАТУШКОЙ

Своевременное отыскание и устранение дефектных узлов и деталей с трещинами является необходимым условием для безаварийной работы техники. В заводских условиях для выявления трещин широко применяются капиллярные методы, метод магнитного порошка, ультразвуковые методы. Но для определения качества деталей в собранной машине в условиях эксплуатации эти методы малопригодны. Обычно в таких случаях ограничивались осмотром

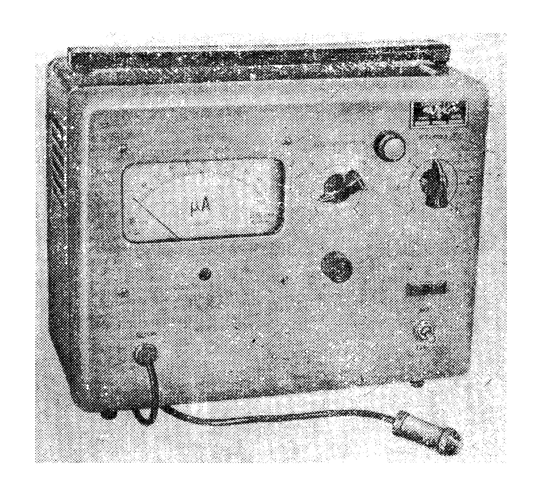


Рис. 17. Дефектоскоп ДНМ-500.

с привлечением несложных оптических средств. В 1958 г. были разработаны статические амплитудно-фазовые дефектоскопы ДНМ. Низкочастотные дефектоскопы с испытательной частотой 15 кГц применялись для выявления поверхностных и подповерхностных трещин в сплавах с удельной электрической проводимостью 10—40 МСм/м. Дефектоскопы с рабочей частотой в 500 кГц применяют для выявления трещин в сплавах с удельной электрической проводимостью ниже 5 МСм/м (рис. 17).

Протяженность выявляемых трещин глубиной 1 мм с помощью этих приборов примерно равна радиусу датчика прибора. Дефектоскопом ДНМ-15 при контроле деталей из алюминиевых сплавов выявлялись поверхностные трещины глубиной 0,15—0,2 мм. Чувствительность прибора к трещинам под слоем металла (той же электропроводности) толщиной 0,2 мм практически не уменьшается.

При использовании амплитудно-фазового метода отстройки уменьшение электрической проводимости вызывает эффект, аналогичный появлению поверхностной трещины, причем для прибора ДНМ-15 изменение электрической проводимости на 1 МСм/м эквивалентно увеличению глубины трещины примерно на 0,3 мм. Трудность, связанная с необходимостью распознавания этих изменений,

преодолевается путем приобретения соответствующего навыка оператором. На показания прибора влияет также кривизна поверхности детали. Изменение радиуса кривизны на 5 мм вызывает такой же эффект, как и появление трещины глубиной 0,3 мм. Прибор реагирует на близость края, выступов, резкие изменения толщины (менее 0,7 мм). Дефектоскопом выявляют усталостные, закалочные трещины и плены в магниевых сплавах, если они выходят на поверхность детали.

Весьма эффектным оказалось применение прибора для выявления дефектов в барабанах и ребордах колес самолетов по окрашенной поверхности. На многих ремонтных предприятиях гражданской авиации такой контроль позволил увеличить число посадок самолета без осмотра колес в 7 раз. В производственных условиях

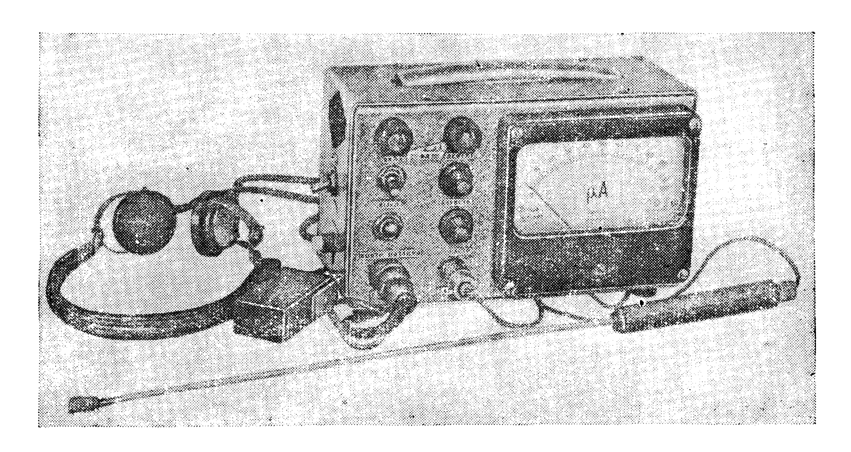


Рис. 18. Статический дефектоскоп для ручного контроля.

датчик плотно прижимается к борту или реборде колеса и передвигается по поверхности барабана с постоянной скоростью. Проверку производят несколько раз: после обточки по внешнему контуру, после полной механической обработки, после оксидирования и окраски. В поверхностных слоях литых барабанов выявляются окисные плены, шлаковые и флюсовые включения, микрорыхлота и трещины; в штампованных колесах: грубые окисные плены и трещины.

Приборы использовали при контроле качества лонжеронов под обшивкой, дюралевых тяг, воздушных винтов. В спорных случаях участок очищают от покрытий, травят и просматривают с помощью лупы с 4-кратным увеличением. С помощью дефектоскопа ДНМ-500 удавалось выявлять трещины глубиной более 1 мм под слоем металла толщиной 0,55 мм. Эти приборы использовали для контроля качества пера лопаток газотурбинных двигателей при стендовых испытаниях или при эксплуатации без разбора двигателя. В настоящее время их используют для проверки качества лопаток авиационных двигателей на самолетах.

В конце 60-х годов на смену амплитудно-фазовым дефектоскопам пришли приборы, использующие амплитудно-частотный способ

(рис. 18). Весьма удачным по своим техническим данные оказался дефектоскоп (ППД), который выпускается промышленностью уже более 11 лет. Принципиальная схема одной из моделей этого прибора показана на рис. 19. Прибор состоит из автогенератора на транзисторе T_1, апериодического усилителя, детектора и моста постоянного тока. Кроме основного канала, на транзисторах T_1 и T_2 и T_3 в приборе имеется второй канал, генератор которого выполнен на транзисторе T_4. Этот канал обеспечивает сигнализацию об увеличении зазора между датчиком и контролируемым изделием; частота сигнала 1—1,5 кГц.

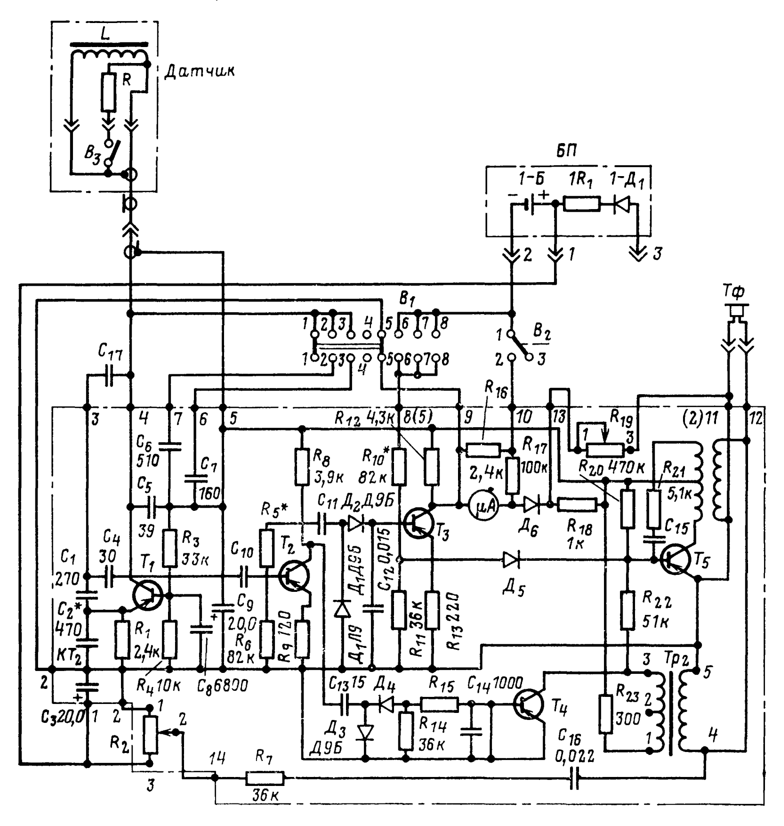


Рис. 19. Принципиальная схема прибора ППД.

При оптимальном режиме настройки генератор заперт положительным напряжением, снимаемым с резистора R. Если зазор между датчиком и контролируемым изделием увеличивается, возрастает амплитуда колебаний высокочастотного генератора, питающего датчик. Это напряжение снимается с коллектора транзистора T_2, де-

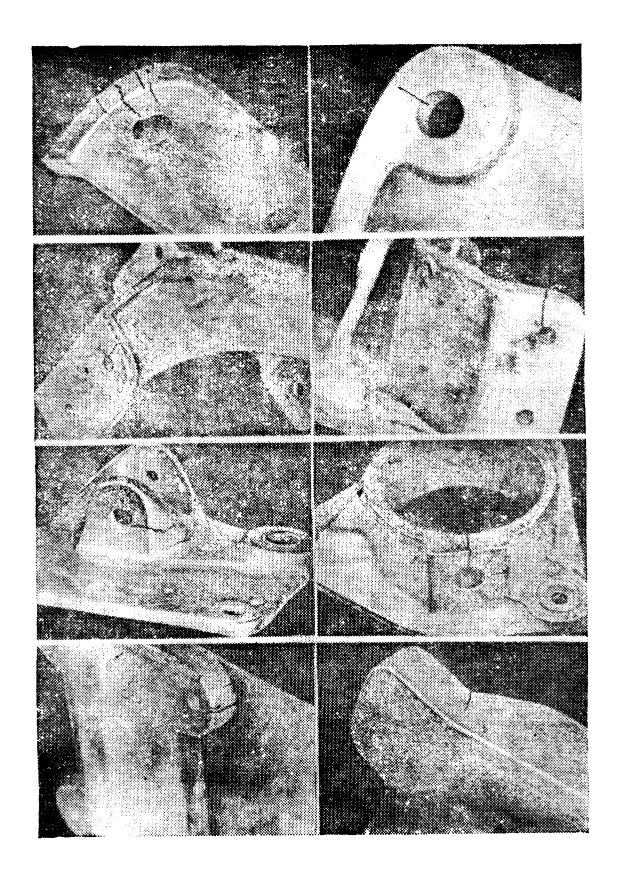


Рис. 20. Трещины в деталях сложной конфигурации.

тектируется диодами $Д_2$ и $Д_3$, поступает в отрицательной полярности на базу транзистора T_4, открывая его. Порог срабатывания устанавливается резистором R_2. Сигнал от зазора и сигнал от дефекта хорошо различаются на слух. Изменяя емкость конденсатора обратной связи C, включенного между эмиттером и коллектором, можно регулировать режим работы генератора. Его выбирают таким, чтобы при наличии трещины под датчиком генерация срывалась. О наличии трещин судят по характерному тону сигнала в телефоне.

В 60-е годы монополистом по производству электромагнитных дефектоскопических приборов был институт Ф. Ферстера (ФРГ). С помощью разработанного им дефектометра контролировались сложные детали в самолетах американской компании «Боинг». Этот довольно тяжелый и неудобный прибор фирма привезла в Москву на Международную выставку 1969 г.

В павильоне отечественных приборов демонстрировались портативные дефектоскопы с аналогичными характеристиками, которые

выпускались к тому времени в СССР уже шесть лет. Только в 1971 г. в США появился патент примерно на такое же устройство.

Дефектоскоп ППД-1 чувствителен к близости края детали, выступам, переходам; этим прибором сложно контролировать детали из слабомагнитных сталей с неоднородной структурой. Известен случай, когда дефектоскопист снял лопатку из такого материала, установленную в турбине двигателя самолета, готового к полету, но трещины в ней не оказалось, так как выступающая часть лопатки намагнитилась. Возник вопрос: нельзя ли сам автогенератор заставить вырабатывать необходимый сигнал о трещине, месте положения датчика, угле его наклона, намагниченности зоны контроля. Так родилась и была всесторонне опробована новая идея. Сейчас она положена в основу ряда портативных статических дефектоскопов. В нашей стране разработан вариант амплитудно-частотного дефектоскопа — дефектоскоп ППД-3. В авторском свидетельстве способ, на котором он основан, назван способом прерывной генерации. С помощью приборов ППД удается выявлять самые разнообразные дефекты на поверхности деталей самолетов (рис. 20) и проверять труднодоступные участки. Наиболее эффективно применение приборов для разовой или периодической проверки однотипных деталей в полевых условиях, при ремонте, когда другие, например капиллярные, методы из-за наличия нагара, краски, анодной пленки применить не удается. Поэтому такие дефектоскопы применяют главным образом для ежедневного эксплуатационного контроля.

21. МОДУЛЯЦИОННЫЕ И ГРАДИЕНТОМЕТРИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ

При изготовлении деталей нужно выявлять тонкие трещины в самой начальной стадии их зарождения. Необходимой чувствительностью обладают лишь модуляционные дефектоскопы. Принцип работы модуляционного дефектоскопа (рис. 21) подобен принципу передачи и приема амплитудно-модулированных сигналов. Дефектоскоп содержит генератор *Г*, датчик *Д*, усилитель высокой частоты *УВЧ*, детектор *ДЕТ*, усилитель низкой частоты *УНЧ*, фильтр *Ф*, синхронный детектор *СД* и блок питания *БП*. Кроме того, де-

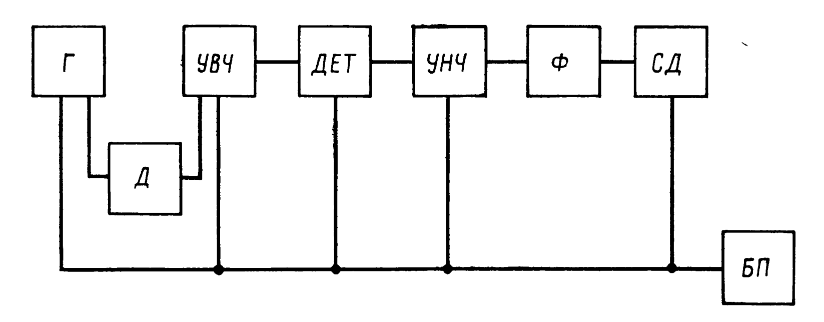


Рис. 21. Структурная схема модуляционного дефектоскопа.

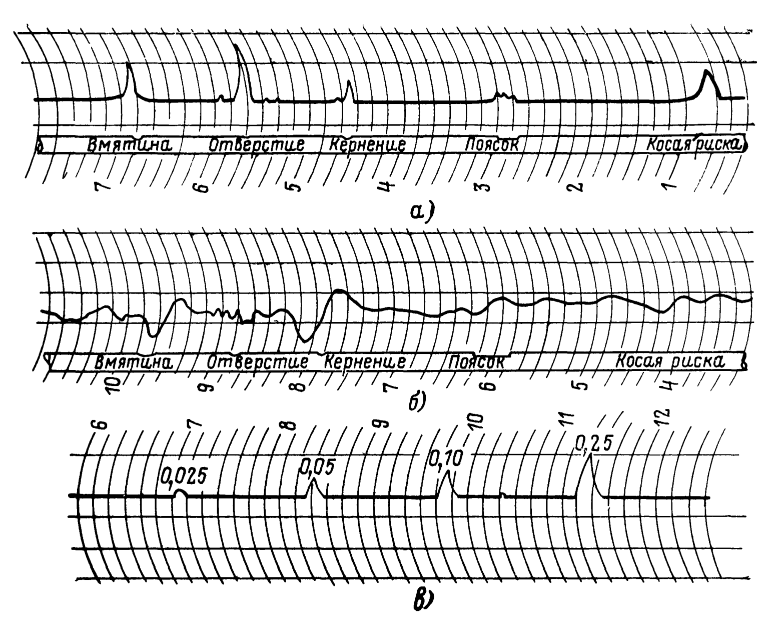


Рис. 22. Запись выходного сигнала модуляционного дефектоскопа.

фектоскоп содержит индикатор с электронно-лучевой трубкой (на схеме не показан). К прибору подключают самописец.

Величина сигнала в определенных пределах зависит от скорости движения датчика. Если датчик, перемещаемый по контролируемому изделию с постоянной скоростью, попадает на трещину, то возникает кратковременный всплек электромагнитного поля. Вырабатываемые генератором колебания высокой частоты модулируются этим низкочастотным сигналом. Фильтр низкой частоты отделяет сигнал, рожденный всплеском электромагнитного поля, от несущих высокочастотных колебаний. Самописец фиксирует его в виде импульса (рис. 22, *а—в*).

По форме и амплитуде импульса можно приблизительно судить о глубине, протяженности и ширине дефекта. При перемещении датчика по поверхности изделия импульс от дефекта перемещается по экрану электронно-лучевой трубки, поэтому по положению импульса можно определить местонахождение дефекта.

Скорость нарастания и длительность импульса, вызванного наличием небольшой несплошности или отверстия, при постоянной скорости перемещения датчика зависят от ширины измерительной катушки (в проходном варианте) или диаметра катушки (в накладном варианте) .

Опыт показывает, что увеличение скорости перемещения датчика выше определенного предела не приводит к линейному росту амплитуды низкочастотного сигнала. Но даже небольшое подмагничивание ферромагнитных деталей приводит к резкому изменению сиг-

нала шума из-за возникающих при этом полей рассеяния на неоднородностях структуры.

Первые модуляционные дефектоскопы с вращающимися накладными катушками были разработаны и изготовлены в 1964—1965 гг. Макет одного из них показан на рис. 23. Его датчик выполнен в виде отдельного блока (рис. 11), чувствительный элемент представляет собой 2 рядом расположенные катушки с ферритовым сердечником диаметром 1,2 мм. Катушки удалены друг от друга на расстояние 2 мм. Наименьший диаметр контролируемой зоны 16 мм

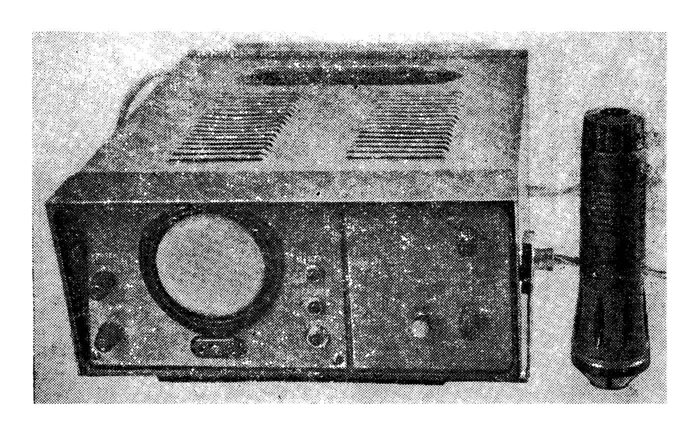


Рис. 23. Модуляционный дефектоскоп.

При наличии дефекта на экране электронно-лучевой трубки видны два импульса. На торце датчика установлена дополнительная сигнальная неоновая лампочка. Частота вращения катушек датчика 1500 и 3000 об/мин.

Такого типа дефектоскопы используют для контроля деталей в виде тел вращения, прутков и труб. С помощью прибора выявляются цепочки пор, подповерхностные плены, вытянутые в длину несплошности металлургического происхождения. Более высокая чувствительность обеспечивается при контроле шлифованной поверхности.

С помощью модуляционного дефектоскопа обнаруживают поверхностные дефекты во всех проводящих материалах, включая ферромагнитные сплавы, с удельной электрической проводимостью от 0,7 См/м и выше даже в условиях резкого изменения электропроводности, например на зачищенных сварных швах.

Весьма интересны дефектоскопы с комбинированными индукционными и феррозондовыми градиентометрическими датчиками, с помощью которых фиксируются изменения вторичного электромагнитного поля. В дефектоскопе Львовского физико-механического института УЭД диапазон рабочих частот 1,5—200 кГц.

Действие прибора основано на амплитудно-фазовом анализе основной частоты или гармонических составляющих (при контроле ферромагнитных материалов). Сигнал с датчика после усиления подается на модулятор. Измеряемый и опорный сигналы преобразу-

ются и дальнейшая информация обрабатывается на промежуточной частоте 910 Гц. Оба напряжения поступают на фазочувствительные цепи и далее на индикатор.

С помощью прибора УЭД выявляются отверстия диаметром 1 мм на нижней стороне листа толщиной 3 мм. Структурная схема основного канала прибора показана на рис. 24. Блок генератора *БГ* содержит задающий генератор рабочей частоты с усилителем мощности, компенсатор, задающий генератор управляющей частоты, ограничитель опорного напряжения рабочей частоты, балансный мо-

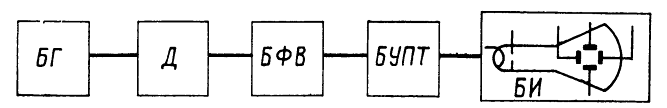


Рис. 24. Структурная схема дефектоскопа с градиентометрическим датчиком.

дулятор и избирательный усилитель. Усиленное напряжение рабочей частоты через токовые обмотки компенсатора подается в датчик *Д*. Одновременно это напряжение подается для формирования опорного сигнала. Преобразованный по частоте опорный сигнал поступает в блок фазовращателя *БФВ,* где осуществляется плавная регулировка фазы опорного сигнала в диапазоне 0—360°. Преобразованный по частоте и усиленный в блоке *БУПТ* измерительный сигнал поступает в блок электронно-лучевой трубки *БИ*. Здесь он расщепляется на два сигнала, сдвинутые на 90°. Эти напряжения образуют на экране трубки круговую развертку. Для фиксирования положения конца вектора измеряемого напряжения круговая развертка подсвечивается коротким импульсом, сформированным из опорного напряжения в блоке фазовращателя.

В режиме модуляционного контроля на пластины трубки поступает сигнал постоянного тока с фазового детектора, а на горизонтальные пластины через блок усилителя постоянного тока *БУПТ* подается напряжение развертки от датчика линейного перемещения.

22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С ТРЕЩИНАМИ

Раннее распознавание повреждения материала деталей, установленных в машине, необходимо для прогнозирования срока службы детали и оставшегося запаса прочности. Под оставшимся запасом прочности имеется в виду комплекс характеристик: статически измеренная прочность образца на разрыв при комнатной температуре, жаропрочность, ползучесть, чувствительность материала к трещинам, скорость их распространения и др. Непосредственной причиной усталостных разрушений является наличие концентраторов напряжений: уступов, выточек, борозд, небольших сквозных отверстий, царапин. В первых опытах для концентрации напряжения посередине образца (лист дюралюминия) просверливалось отверстие диаметром по 4 мм. При испытаниях использовали два накладных

датчика, которые устанавливались по разные стороны отверстия с помощью прижимного приспособления. Запись выходных сигналов датчиков проводилась по двум каналам регистрирующего прибора в течение всего времени работы горизонтального пульсатора. По третьему каналу записывались изменения температуры помещения. В результате была выявлена зависимость между механическим напряжением и числом циклов до момента возникновения трещины и разрушения образца; оказалось, что наличие плакировки или анодной пленки вызывает более раннее проявление трещины. Кроме того, была сделана попытка оценить скорость развития трещин. Датчик низкочастотного амплитудно-фазового дефектоскопа устанавливался на трещине. Если сигнал от трещины превышал установленный порог, срабатывала следящая система, перемещающая датчик вдоль распространения трещины. В качестве привода, а также следящего и регистрирующего прибора использовался автоматический потенциометр. Датчик такого устройства кинематически соединен с системой перемещения пишущей каретки потенциометра и всегда находится в положении устойчивого равновесия на конце неподвижной трещины. Сигнал с выхода дефектоскопа снимался через делитель напряжения, включенный параллельно измерительному прибору. Этот способ позволил получить автоматическую запись длины трещины во времени при однократном или повторном нагружении в условиях заданной нагрузки или деформации и осуществить циклические испытания при заданном среднем напряжении в сечении детали. С помощью такой методики была изучена кинетика развития трещин в образцах из дюралюминия и показано благотворное влияние на эту характеристику естественного старения.

ГЛАВА ШЕСТАЯ
ТОЛЩИНОМЕТРИЯ

23. ПРОБЛЕМЫ ТОЛЩИНОМЕТРИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

На производстве часто необходимо измерить диаметр проволоки, прутка, толщины стенок трубы, листа, фольги и т. п. при движении контролируемого объекта. Наружный диаметр можно измерить оптическими средствами или радиоизотопными приборами. Не менее эффективно для этой цели и применение метода вихревых токов.

Контроль диаметра проволоки, прутков, труб, их разностенности (разница между средними значениями толщины стенки в поперечном сечении по их длине) осуществляется приборами с проходной катушкой. Они весьма удобны для автоматизации производственного процесса, а также для автоматической настройки и регулирования станов, производящих эти изделия. Ну, а как измерить разностенность толщины стенок труб или толщину панели при ее изготовлении? Такая панель точно установлена на плите фрезерного станка и снять ее оттуда для измерений — большая затрата рабочего времени. Еще сложнее вынуть панель из раствора горячего электролита при ее химическом фрезеровании А этот процесс охватывает все большее число деталей, так как обеспечивает достаточно высокую точность, чистоту поверхности и многие другие положительные ка-

чества. Завышение толщины стенок вафельных панелей, трубопроводов, охлаждаемых лопаток и других деталей приводит к увеличению веса конструкций, а занижение, выявленное на поздних стадиях изготовления, приводит к неоправданным затратам, связанным с изготовлением заведомо негодных деталей. Большую опасность представляют утонения сосудов высокого давления или панелей, изготовляемых на станках с вакуумными приспособлениями или получаемых путем химического фрезерования.

Здесь также находится дело вихревым токам, например при химическом фрезеровании, когда имеют дело с горячими электролитами. На основе метода вихревых токов разработаны толщиномеры с накладными и экранными датчиками. При изготовлении панелей из алюминиевых сплавов путем химического фрезерования датчики приборов опускают в горячий электролит. Необходимость такого вида контроля определяется тем, что заранее определить время, необходимое для стравливания металла на заданную величину, практически невозможно, так как скорость травления является сложной функцией температуры и концентрации раствора, внутренних напряжений и многих других факторов. Обычно скорость травления выше на тех участках, где внутренние напряжения отсутствуют. При длительном травлении увеличение содержания растворенных продуктов реакции повышает удельный вес раствора, вызывает его загустевание и заметно уменьшает скорость травления. При местном фасонном травлении фрезеруемая деталь извлекается из травящего раствора щелочной ванны, осветляется в растворе азотной кислоты, промывается в проточной воде, в требуемом месте снимается защитная пленка и с помощью скобы с индикатором замеряет-

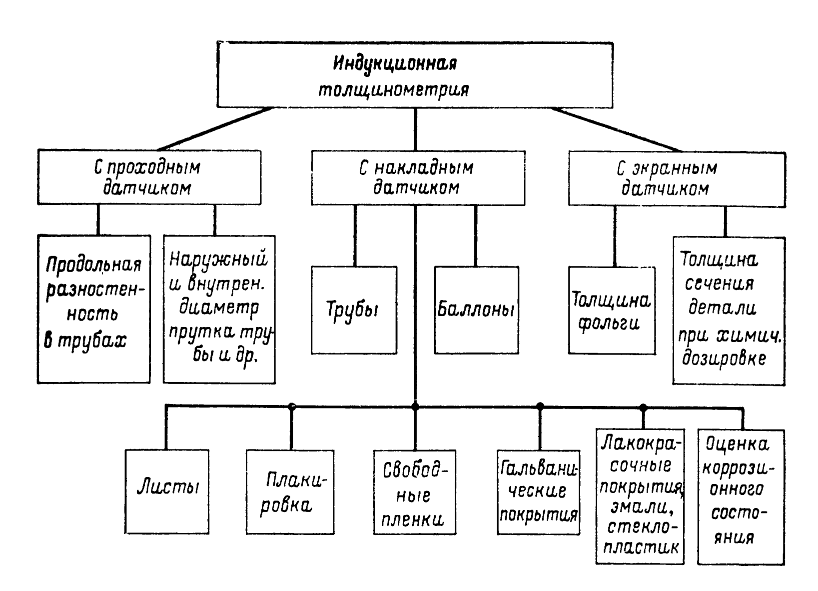


Рис. 25. Диаграмма применения метода вихревых токов в толщинометрии.

ся толщина остаточного сечения детали. Если толщина больше допустимой, то зачищенная зона вновь покрывается краской, просушивается, и деталь вторично погружается в травящий раствор. Эта операция повторяется до тех пор, пока не будет достигнута указанная в чертеже толщина. Продолжительность такого контроля в несколько раз превосходит время, затрачиваемое на травление детали в ванне и приводит к значительным потерям щелочей и кислот.

От качества покрытий наружных поверхностей аппаратов зависит их внешний вид. Невыполнение требований по обеспечению необходимой толщины покрытий резко снижает коррозионную стойкость материалов и, следовательно, длительность работы механизмов и машин. Толщина покрытий деталей современных машин составляет от 5 мкм до 120 мм. Вопросы толщинометрии тесно связаны с проблемой предупреждения оценки степени коррозионных поражений. Эта проблема находится в центре внимания многих ведущих стран мира. Примерная стоимость убытков американских авиационных компаний в результате коррозии оценивается в 12 млн. долларов в год. Затраты по ликвидации последствий коррозии деталей самолетов составляют 6 млн. долларов. Задача состоит в том, чтобы не только выявить, но и оценить степень коррозионного поражения.

Основные направления по применению метода вихревых токов для решения проблем толщинометрии в машиностроении показаны на рис. 25.

24. КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ СТЕНОК ТРУБ, ТРУБОПРОВОДОВ И БАЛЛОНОВ

Наиболее удобным объектом для применения электромагнитных толщиномеров служат баллоны и трубы, изготовленные из немагнитных или слабомагнитных материалов. Трубы в виде полуфабрикатов поставляются авиационным, судостроительным и другим заводам специального назначения. Утонений в них допустить нельзя. Для контроля толщины стенок баллонов и труб были разработаны амплитудные одно- и двухчастотные приборы с датчиками, которые прижимались к контролируемой поверхности фарфоровым или агатовым наконечниками. В процессе контроля эти наконечники изнашивались и, следовательно, изменялись параметры датчиков и чувствительность прибора. Кроме того, датчик может оставлять на поверхности трубы риски и царапины, не допустимые ГОСТ.

Одним из первых был разработан двухчастотный толщиномер ТВ-2Ч. Он предназначен для бесконтактного измерения толщины стенок и разностенности труб диаметром от 30 до 80 мм с толщиной стенки от 0,8 до 5 мм из немагнитных сталей аустенитного класса. Прибор такого типа состоит из двух каналов, один из которых работает на сравнительно высокой частоте, например 200 кГц, а другой на частоте 2,5 кГц. С генераторов напряжения подаются на два измерительных моста переменного тока, общим элементом которых является датчик. Сигналы рассогласования с обоих мостов разделяются с помощью фильтров высокой и низкой частот, усиливаются, детектируются и поступают на блок сигнализации о браке; усиленное и выпрямленное низкочастотное напряжение используется для изменения величины низкочастотного сигнала пропорцио-

нально изменению зазора. Испытания прибора показали, что при изменении контролируемой толщины стенки на 20—25% от номинала отстройка от влияния изменений зазора не нарушается. Движение трубы со скоростью 1—3 м/с на показания прибора не влияет и отстройку от зазора не нарушает. Испытания приборов на трубных заводах подтвердили, что изменения расстояния между датчиком и трубой в пределах 0—2,5 мм на показания не влияют. Два таких прибора были внедрены еще в 1962 г. Однако при эксплуатации приборов выяснилось, что они сложны в настройке, поэтому

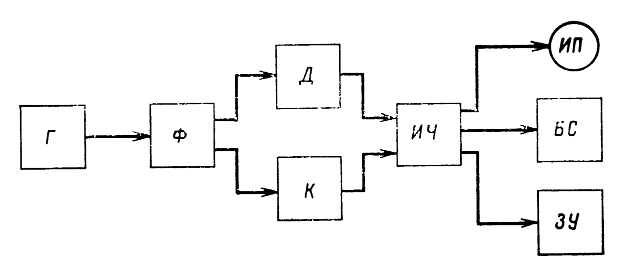


Рис. 26. Структурная схема амплитудно-фазового **толщиномера.**

в дальнейшем были разработаны амплитудно-фазовые толщиномеры ТВФ (рис. 26). В этих приборах обеспечена настройка от влияния изменений зазора до 3 мм. Напряжение с генератора *Г* поступает на фазовращатель *Ф* и систему из измерительной *Д* и компенсационной *К* катушек датчика, включенных по дифференциальной схеме. Сигнал рассогласования с датчиков поступает на измерительную часть *ИЧ*, содержащую усилитель и фазочувствительный выпрямитель, на который также подается опорное напряжение с фазовращателя. Фаза этого напряжения отличается на 90° от фазы сигнала, возникающего вследствие колебаний зазора. В устройстве используется управляемый резистор, с помощью которого корректируют фазу опорного напряжения. С фазочувствительного выпрямителя сигнал поступает на индикатор *ИП*, блок автоматической сигнализации *БС* о выходе толщины стенки за допустимые пределы и записывающее устройство *ЗУ*.

Разработано пять модификаций приборов. С их помощью производился поточный контроль толщины стенки всех тонкостенных и особо тонкостенных нержавеющих труб из сталей аустенитного класса, а также некоторых сортов труб из титановых и алюминиевых сплавов.

Приборы ТВФ-2 были применены для измерения и регистрации толщин стенок и разностенности труб в процессе горячей прокатки на непрерывной трубопрокатной установке при температуре труб 800—1000°С. Скорость движения труб во время прокатки 8—9 м/с, диапазон контролируемых толщин 1,5—6,0 мм. Датчик прибора охлаждался жидкостью.

Примерно такого типа устройство было предложено для автоматического измерения и регулирования толщины стенки труб, изготовляемых на стане ХПТ-75. Диапазон контролируемых труб от 30 до 75 мм, толщина стенок 1—6 мм.

Следующий этап в развитии электромагнитной толщинометрии — фазовые толшиномеры. Принцип их работы основан на измерении разности фаз напряжений на измерительной катушке и фазорегулирующем устройстве (фазовращателе). Фазовый толщиномер работает следующим образом. Сигнал с генератора поступает на возбуждающую обмотку датчика и через фазовращатель — на один из входов фазометра. На второй вход фазометра подается усиленное напряжение сигнала разбаланса с компенсационной и измерительной катушек. Разность фаз этих напряжений, зависящая от толщины контролируемого изделия, измеряется фазометром с индикаторным устройством, проградуированным в миллиметрах. Эти приборы можно использовать с экранными или накладными датчиками. Один из таких приборов был использован для решения задач контроля остаточного сечения деталей при их химическом фрезеровании В этом случае необходимо обеспечить жесткую стабилизацию частоты, так как изменение частоты на 1% приводит к дополнительным погрешностям порядка 0,5%.

Изменение амплитуды сказывается на точности измерения толщины стенок в значительно меньшей степени и может быть уменьшено, если опорный сигнал снимать с резистора, включенного последовательно с возбуждающей обмоткой датчика.

В этом случае фаза опорного направления совпадает с фазой тока возбуждающей обмотки датчика и поэтому разность фаз сигналов, подаваемых на фазометр, не зависит от амплитуды тока в возбуждающей обмотке. При этом значительно уменьшается влияние перемещения контролируемого изделия в зазоре между катушками экранного датчика. Для обеспечения линейности шкалы индикатора прибора частота питающего датчика тока выбирается из условия: $T\sqrt{\omega\mu\sigma} > 2$, где T — толщина стенки.

Например, при контроле медных листов толщиной более 1 мм рабочая частота должна иметь значение

$$f \geqslant \frac{4}{2\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 57 \cdot 10^{6} \cdot 10^{-6}} \approx 9 \text{ кГц}.$$

Для контроля алюминиевых листов с удельной электрической проводимостью 20 МСм/м и толщиной более 2 мм рабочая частота равна 6,25 кГц.

При контроле панелей в процессе химического фрезерования приходится создавать дополнительный зазор со стороны фрезеруемой поверхности в 4—5 мм, необходимый для нормального травления.

Точность измерений толщины стенок в значительной степени определяется погрешностью измерения разности фаз сигнала и опорного напряжения. Оказалось весьма удобным применять электронные фазометры с формирователями коротких импульсов. Использование в выходных устройствах этих фазометров двухтактных спусковых схем значительно уменьшает погрешности измерений, связанные с асимметрией ограничения и изменением фронтов запускающих импульсов.

Такие фазометры введены в новый универсальный фазовый толщиномер ФТ-1 для бесконтактного контроля толщины стенок деталей из алюминиевых сплавов в процессе химического фрезерования, а также для пооперационного контроля толщины стенок деталей. Диапазон измеряемых толщин при использовании экранных датчи-

ков 0,95—8,0 накладных 0,5—4,0 мм. Особенно эффективен прибор при окончательном контроле после химического фрезерования без снятия защитной пленки и механической обработки конструкций сложной формы, когда по техническим условиям требуется проверка толщины каждой ячейки детали Экранный датчик питается током частотой 6 кГц, а накладной датчик током частотой 1 кГц. Прибор снабжен набором экранных датчиков, обеспечивающих возможность контроля любой зоны детали, удаленной от края до 1000 мм. При изменении расстояния между накладным датчиком и изделием в пределах 0—0,5 мм дополнительная погрешность измерений не превышает 0,5% контролируемой величины на всех диапазонах. В процессе химического фрезерования детали толщина ее непрерывно уменьшается и стрелка индикатора с закрепленным на ней флажком приближается к стрелке блокирующего устройства. При достижении требуемой толщины флажок перекрывает фотодиод, срабатывает реле, включающее выгружающее устройство. Для защиты от воздействия щелочей и кислот датчик покрывается эмалью, стойкой к агрессивным средам, и герметизируется эпоксидной смолой с полиэтиленполиамином.

Фазовые толщиномеры используют также для оценки толщины остаточного сечения деталей из алюминиевых сплавов при их коррозионном поражении, этом биче современных металлических материалов.

Коррозия — разрушение металлов и сплавов под действием химических или электрохимических факторов. Самая распространенная — электрохимическая коррозия разъедает детали из алюминиевых и магниевых сплавов на самолетах в естественных атмосферных условиях, воздействует на металл в воде и других средах.

Процессы коррозии классифицируют по тем изменениям, которые наблюдаются в поверхностной зоне материала. Многие виды коррозии поражают значительные участки металла, резко снижая его прочность и другие свойства. В этом случае нужно знать оставшееся сечение детали, еще не тронутое коррозией.

Возможность применения толщиномера для оценки остаточной толщины детали определяется тем, что подверженный коррозии слой имеет существенно меньшую электропроводность, чем «здоровый» металл, а отстройка от зазора обеспечивает нечувствительность показаний прибора к изменению глубины коррозионных поражений.

Английская фирма «Аркроб» разработала электромагнитный толщиномер-коррозионоскоп для проверки деталей самолетов из алюминиевых сплавов толщиной 0,8—12 мм. Минимальная рабочая частота 100 Гц. Прибор такого типа должен иметь сравнительно небольшой по размерам датчик, так как коррозия весьма часто начинается между болтовыми соединениями и заклепками.

25. ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ

Качество и долговечность продукции, выпускаемой на машиностроительных предприятиях, во многом определяются состоянием и толщиной покрытий. Тонкие гальванические покрытия не обеспечивают надежной защиты, а слишком толстые шелушатся и отслаиваются. Наносить толстые покрытия невыгодно.

Современные покрытия не только защищают материалы от коррозии, но и обеспечивают постоянство электрических параметров,

уменьшают электризуемость, увеличивают теплоизлучательную способность, маскируют от оптического дешифрования. Наряду с лакокрасочными покрытиями на основе нитроцеллюлозы, масляных и алкидных смол применяют синтетические полимеры с пигментами и наполнителями. В качестве пигмента при защите алюминиевых сплавов используют цинковый крон или смесь цинкового крона (цинковых белил) и небольшого количества сажи. Широко применяют глифталевые, перхлорвиниловые, эпоксидные, акриловые, эфироцеллюлозные и другие лаки и эмали.

Измерение толщины покрытий, нанесенных на немагнитные металлы, — одно из самых важных применений метода вихревых токов. При этом измеряют зазор между катушкой датчика и поверхностью металла. Линейность шкалы, диапазон измерений зависят от электрических свойств покрытий и технологии их нанесения. Хорошими изолирующими свойствами и высоким поверхностным сопротивлением обладают перхлорвиниловые эпоксидные и полиуретановые покрытия. Электрические свойства большинства стеклопластиков после длительного пребывания во влажной атмосфере или воде ухудшаются. В этих случаях используют низкочастотные приборы.

При измерении толщины диэлектрических покрытий на электропроводящем основании основным мешающим фактором является изменение удельной электрической проводимости материала детали. Чтобы снизить влияние этих изменений, рабочая частота толщиномера должна быть порядка 1—10 МГц.

Первым отечественным измерителем толщины лакокрасочных и анодированных покрытий был разработанный в 1958 г. прибор ТПН-1, в течение 15 лет выпускавшийся московским заводом «Контрольприбор», а затем заводом «Электроточприбор» (Кишинев). Рабочая частота этого прибора 2 МГц. Их широко применяют для контроля толщин от 10 до 300 мкм и равномерности покрытий на немагнитных сплавах. В резонансный контур прибора включен параметрический однокатушечный датчик с ферритовым сердечником, это обеспечивает высокую чувствительность прибора при малых размерах датчика с некоторым ущербом для его температурной стабильности, так как ферриты имеют сравнительно большой температурный коэффициент.

Толщиномер ТПН-1 используют для измерения твердости резины (рис. 27) с помощью нагруженной иглы, к которой сверху укреплен очень легкий экран из меди. Твердость резины определяется по глубине укола, определяемой по зазору между датчиком и экраном.

Измерения с помощью приборов ТПН-1 проводятся на плоском участке детали размером в 2—3 больше диаметра датчика. Однако толщина детали должна быть не меньше 0,4 мм. Можно измерять толщину покрытия на деталях сложной формы, но при этом необходимо выставлять стрелку индикатора прибора на нуль по образцам, имеющим такие же размеры, как и контролируемое изделие. Измерения толщины покрытий прибором ТПН-1 на некоторых магниевых сплавах, немагнитных жаропрочных и титановых сплавах с низкой электрической проводимостью дают значительную погрешность, превышающую установленную ГОСТ погрешность (10%) для приборов этого класса. Погрешность увеличивается при изменениях радиуса кривизны поверхности, особенно если он менее 30 мм.

В толщиномере ТПН-П рабочая частота 5,3 МГц. Датчик намотан на ферритовом стержне диаметром 0,5 мм. Внешний диаметр

катушки 1 мм. Датчик таких размеров дает возможность контролировать толщину эмалевых покрытий на криволинейных поверхностях деталей из жаропрочных немагнитных сплавов.

Измерение толщины диэлектрических и немагнитных электропроводящих покрытий на ферромагнитном основании наиболее целесообразно на низких частотах. Датчики толщиномеров этого класса могут выполняться в виде катушек или воздушных трансформаторов с ферромагнитными сердечниками или без них.

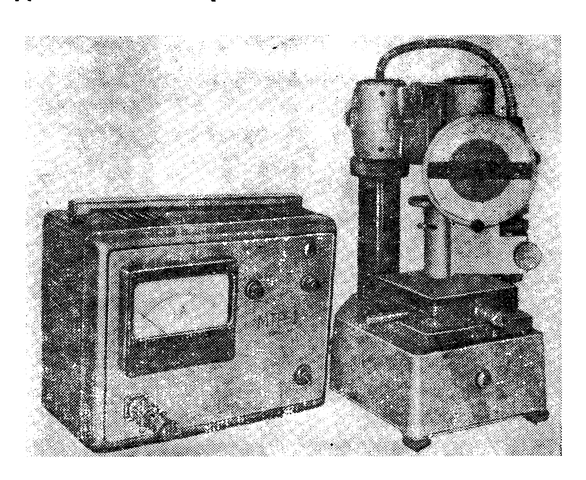


Рис. 27. Использование толщиномера ТПН-1 в микротвердомере для контроля твердости резины.

Основной источник погрешности при контроле немагнитных покрытий на ферромагнитном основании с помощью этих приборов связан с неоднородностью магнитных характеристик основания. Очень трудно обеспечить малую погрешность и высокую чувствительность одновременно. Так, толщиномеры с полузамкнутыми ферромагнитными сердечниками имеют высокую чувствительность, но обладают большой погрешностью за счет вариации магнитной проницаемости основания и повышенной температурной нестабильности. Толщиномеры с датчиком в виде воздушного трансформатора имеют низкую чувствительность, более сложную преобразовательную часть, но зато могут обеспечить более высокую точность измерения.

Низкочастотный прибор с таким датчиком МИП-10 предназначен для измерения толщины гальванических, лакокрасочных, эмалевых и других немагнитных покрытий на ферромагнитной основе в диапазоне от 2 мкм до 2,4 мм. Погрешность измерения 1 мкм+10% измеряемого значения при чистоте обработки контролируемой поверхности ∇7. Шкала прибора нелинейна, отградуирована в микрометрах. Питание прибора автономное от батареи напряжением 12 В. В индукционных толщиномерах с диапазоном измерения порядка десятков миллиметров рабочая частота питающего тока выбирается в диапазоне 20—200 кГц.

Разработаны опытные образцы приборов с датчиками, включенными в резонансные и дифференциальные цепи. Лучшими оказались

датчики, намотанные на ферритовых кольцах. В резонансных приборах изменения толщины покрытий в 20—200 мкм можно после необходимой градуировки отсчитывать по микроамперметру в пределах всего диапазона измерений. Верхний предел на этих приборах настраивается на «бесконечность», что позволяет освободиться от образцовых прокладок для настройки верхнего предела измерений. Толщиномеры этого типа применяют для измерения толщины теплозащиты различных устройств. Это позволило исключить трудоемкую операцию вычисления толщины покрытий путем измерения микрометром суммарной толщины покрытия и подложки на длинной скобе. Рядом с датчиком толщиномера можно установить датчик акустического дефектоскопа и с его помощью определять наличие расслоев. Одно из таких устройств было смонтировано на тележке. Управление такой тележкой автоматизировано.

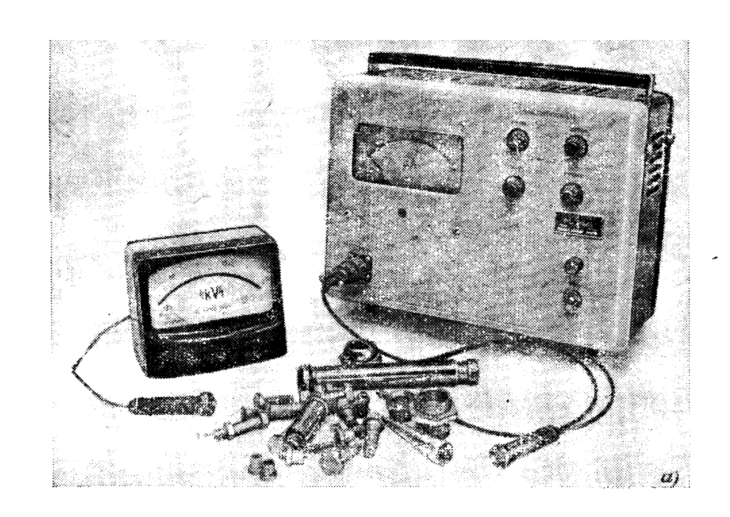
Остановимся на измерениях толщины электроосажденных гальванических покрытий. В машиностроении широкое применение получили серебряные, цинковые, кадмиевые, хромовые, никелевые и другие покрытия. Каждое из них выполняет различные задачи. Так, серебряные покрытия повышают отражательную способность светотехнических и оптических устройств, снижают переходное сопротивление контактов, повышают коррозионную стойкость изделий, работающих в щелочных и агрессивных средах. Толщина серебряных покрытий для легких условий атмосферной коррозии должна быть не менее 6, для средних — не менее 12, а для жестких — не менее 21 мкм. У химической посуды и приборов толщина серебряного покрытия достигает 100 мкм. Но каждый лишний микрон в массовом производстве — это серьезный убыток народному хозяйству. Каждому ясно, как важно экономно и разумно расходовать этот благородный металл. Цинкованием и кадмированием защищают резьбовые нормали, болты, гайки, пружины. Цинковые, а особенно кадмиевые покрытия — надежные защитники против коррозии деталей морских судов. Хромовые покрытия часто выполняют роль смазочного материала. Стальные а особенно цементированные детали с прочностью выше $1,4 \cdot 10^9$ Па не цинкуют, а хромируют. Для крупногабаритных деталей: штоков, рельсов длиной более 400 мм — толщина хрома лежит в пределах 40—80 мкм.

Кристаллическая решетка электроосажденных металлов и сплавов сильно искажена большим количеством примесей и так называемых дефектов упаковки. Это означает, что электрические и магнитные свойства таких покрытий существенно отличаются от свойств этих материалов в свободном ненапряженном состоянии.

Один из лучших видов защиты стальных изделий — цинкование в цианистых и кислых электролитах.

Хромируют детали, работающие в условиях трения или агрессивных средах, не содержащих хлорионов.

По степени трудности задача контроля толщины слоев в двухслойном покрытии существенно отличается от задачи контроля толщины однослойного покрытия. Погрешность измерений электромагнитного толщиномера согласно ГОСТ должна укладываться в 10%. Ее нетрудно обеспечить, если датчик прибора многократно устанавливать в одну и ту же точку контролируемой детали. Но электромагнитные характеристики покрытий непостоянны, особенно никеля, зависят от механической и термической обработки и др. Универсального электромагнитного толщиномера нет. Удалось построить приборы, отградуированные с учетом конкретной технологической опе-



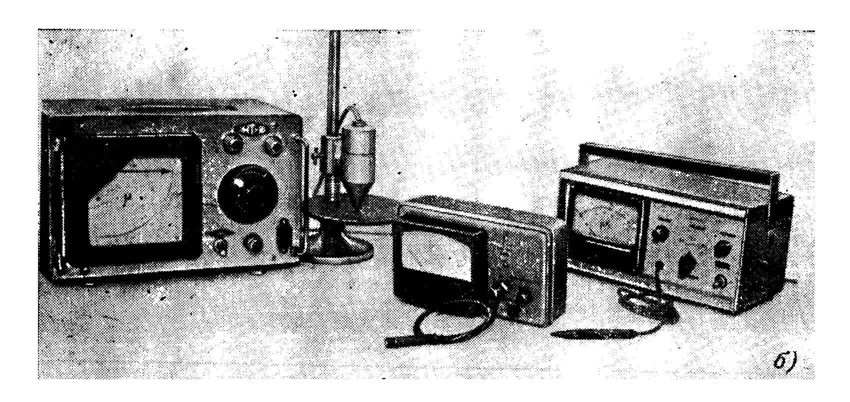


Рис. 28. Электромагнитные приборы для контроля толщины гальванических покрытий.

рации, постоянно используемые для измерения однотипных покрытий на одинаковых деталях. Для этой цели нужны образцовые меры, изготовленные с учетом всех особенностей технологического процесса. В качестве образцовых мер для настройки приборов лучше всего использовать сами контролируемые детали, отобранные для этой цели по показаниям толщиномера. Толщину покрытий на них определяют способом взвешивания, методом капли и другими методами, соответствующими ГОСТ.

Делались попытки измерять толщину гальванических покрытий с помощью вихревых токов непосредственно в гальванической ванне. Опыт показал, что между толщиной покрытия контрольного образца и толщиной покрытия на деталях полной идентичности

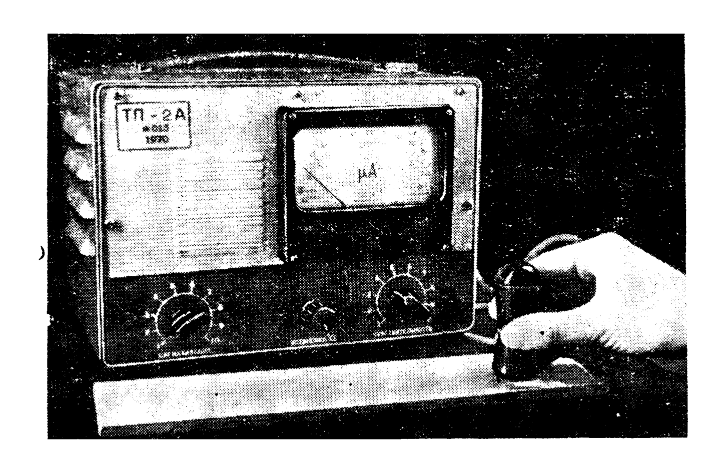


Рис. 29. Прибор ТП-2 для контроля толщины плакировки.

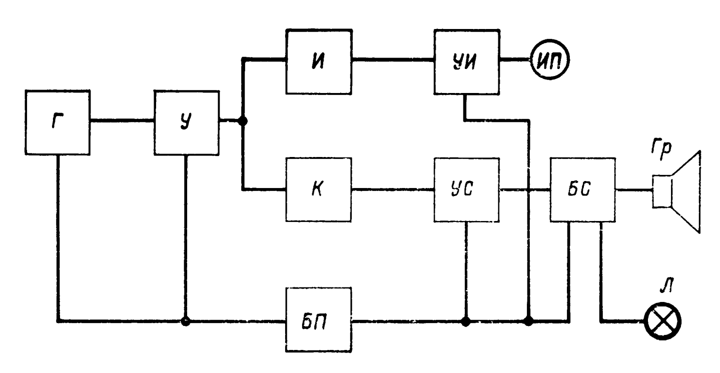


Рис. 30. Структурная схема прибора ТП-2.

нет. Толщина покрытий на деталях зависит от их формы, плотности завески, силы тока и многих других факторов.

Датчики первых приборов для контроля толщины гальванических покрытий имели сравнительно большие размеры. Поэтому их применяли лишь при наличии на контролируемых деталях плоских участков, размеры которых превышали диаметр датчика прибора.

С помощью резонансных приборов, работающих на частотах 0,5—1 МГц, можно измерять толщину слоя серебра, цинка, кадмия, хрома, свинца.

Многие толщиномеры успешно используют в гальванических цехах на производстве (рис. 28, *а*, *в*). Один из них ПИТ-1 предназначен для контроля толщины деталей сложной формы с радиусами переходов до 6 мм. Для этого прибора разработан датчик, диаметр которого вместе с оправкой равен 1,2 мм. Прибор основан на переменно-частотном способе. Начальную частоту выбирают в зависимости от решаемой задачи в диапазоне 500—1000 кГц. Выбором рабочей точки частотного дискриминатора удается уменьшить

влияние свойств основного металла на уход нуля прибора. Достоинства этого прибора — простота в управлении (всего две ручки настройки), батарейное питание, а недостатки — нелинейность шкалы, влияние на показания перекосов датчика.

Этих недостатков практически не имеют фазовые толщиномеры ИТПГ, разработанные под руководством А. Л. Рубина в Новосибирске. Линейная шкала при контроле толщины покрытий на ферромагнитных материалах позволяет использовать для настройки этого прибора всего один контрольный образец.

При разработке методов контроля толщины напыленных слоев приходится решать те же проблемы, что и при контроле электроосажденных, и дополнительно учитывать влияние на показания приборов пористости покрытия.

Плакировку широко применяют для защиты листов из алюминиевых и титановых сплавов в авиастроении. Обычно плакируют листы из сплавов Д16 и В95. Удельная электрическая проводимость этих сплавов в термообработанном состоянии 16—22 МСм/м, а в нетермообработанном она на 4—5 МСм/м выше. Поэтому измеряют толщину плакировки на термообработанных листах.

Толщина плакирующего слоя зависит от назначения листа и толщины основного металла. В приборах контроля плакирующего алюминиевого слоя толщиной 200—400 мкм обычно применяют приборы, датчики которых питаются переменным током частотой 20—60 кГц, при контроле титанового листа — 0,4—4 МГц. При контроле плакировки датчик прибора перемещают поперек направления прокатки с шагом перемещения 20—40 мм. Приборы имеют звуковую и световую сигнализацию о том, что датчик находится в зоне с толщиной плакировки, выходящей за допустимые границы. Приборы используют при изготовлении листа, заменяя трудоемкие выборочные испытания.

На рис. 29 показан общий вид прибора ТП-2, а на рис. 30 приведена его структурная схема. Здесь: *Г* — автогенератор, *У* — усилитель мощности, *И* — катушки измерительного датчика, *К* — катушки компенсационного датчика, *УИ* — усилитель постоянного тока стрелочного индикатора *ИП*, *УС* — усилитель постоянного тока устройства сигнализации, *БС* — блок сигнализации, *БП* — стабилизированный источник питания.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

26. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Теория идеальных кристаллов объясняет так называемые структурно-нечувствительные объемные свойства твердого тела: плотность, диэлектрическую проницаемость, удельную теплоемкость, упругие свойства. Но в кристаллах в огромном количестве существуют нарушения структуры — дефекты. Наиболее мелкие из них точечные — вакансии, более крупные — линейные дефекты — дислокации. Начиная с процесса выплавки металла есть много

причин, мешающих кристаллу принять правильную форму. Кристаллы неправильной формы — зерна или кристаллиты. Обычно размеры зерен 0,1—10 мкм, но встречаются сплавы, где их размеры несколько миллиметров. К дефектам структуры относятся границы зерен, наружная поверхность тела.

Дефекты структуры сильно влияют на электропроводность, прочность, потери на гистерезис (в ферромагнитных материалах). Избыточное количество точечных дефектов в металле получается при резком охлаждении его или при ковке и прокатывании.

Анализ состояния структуры материалов с помощью вихревых токов проводится с целью сортировки материалов по маркам, оценки степени их химической чистоты, выявления и оценки неоднородных по структуре зон, оценки глубины и качества поверхностно-упрочненных слоев, контроля правильности выполнения термической и механической обработки, определения прочности, внутренних напряжений. Метод вихревых токов позволяет контролировать поверхностные слои толщиной в 1—2 мм. Именно здесь, как правило, начинаются и развиваются процессы усталости материалов.

Знаменитый советский ученый Я. Френкель говорил, что прочность и электропроводность — это две стороны одной и той же медали. В основе электромагнитной структуроскопии лежат изменения электрической проводимости и магнитной проницаемости. Эти две структурно-чувствительные характеристики связаны с электронным строением кристаллов, дефектами структуры. Зная удельную электрическую проводимость, можно оценить прочность и твердость, предсказать их изменения в процессе старения.

27. БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Первые приборы для контроля качества немагнитных материалов по их электрической проводимости созданы в 40-х годах. В 1943—1945 гг. Ф. Ферстер (ФРГ) разработал приборы для испытания твердости алюминиевых сплавов. Измерительная катушка дурокавиметра являлась элементом колебательного контура, включенного в цепь сетки генераторной лампы. Важным достижением явилось создание Ф. Ферстером в 1950—1952 гг. прибора Сигматест, известного в Америке и Англии под названием Магнатест кондактивити (Магнатест FM-100). Эти приборы и сейчас применяют металлургические и авиационные компании.

Для уменьшения влияния зазора в приборе Сигматест использована последовательная резонансная цепь. Схема такого типа отличается высокой стабильностью и простотой, поэтому она была положена в основу отечественных измерителей электропроводности [5; 7].

Измерители электропроводности (рис. 31) содержат генератор переменного тока, датчик, включенный в колебательный контур, компенсационную цепь, измерительный блок, усилитель постоянного тока с индикатором. Измерительная часть схемы прибора для измерения электрической проводимости графитов и углей имеет некоторые отличия из-за использования рабочей частоты 5 МГц.

Существенной особенностью измерителей электропроводности является возможность отстройки от влияния изменений зазора в

диапазоне 0—200 мкм. Поэтому эти приборы используют для контроля деталей, покрытых слоем лака, краски, эмали, оксидной пленки и т. д.

Принцип отстройки от зазора с помощью резонансных контуров поясняет рис. 32. Здесь изображены резонансные кривые катушки датчика, находящегося в воздухе и на металле. Для того чтобы обеспечить отстройку от зазора, рабочая частота должна находиться в точке пересечения этих кривых.

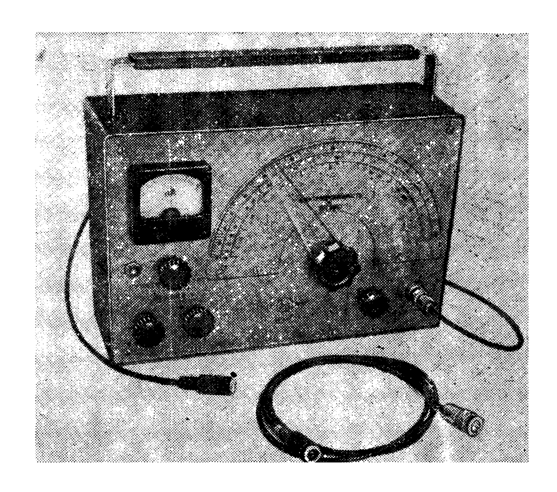


Рис. 31. Измеритель электропроводности ИЭ-Т.

Измерители электропроводности наиболее широко применяют для определения количества примесей в сплавах, сортировки их по маркам, контроля качества термической обработки.

Метод вихревых токов дает возможность по электрической проводимости заготовки в свежезакаленном состоянии судить о механических свойствах детали, которыми она будет обладать после длительного естественного старения. Электрическая проводимость многих термически обработанных свежезакаленных и состаренных алюминиевых сплавов находится в однозначной связи с их твердостью и прочностью. Например, если удельная электрическая проводимость сплава Д16 (лист толщиной 2,5 мм) после закалки равна 19 МСм/м, то в этом случае предел прочности детали будет не ниже 4,25 ГПа (рис. 33).

Испытатели электропроводности применяют для оценки качества зон подварки для контроля качества точечной сварки, определения содержания легирующего элемента, контроля пористости графитов и ряда других задач.

Вихревые токи приходят на помощь и там, где сложный и трудоемкий процесс количественного анализа сильных растворов нужно заменить автоматическим контролем. Кондуктометрический метод применяют при производстве красителей, синтетических волокон, сильных кислот полимерных материалов, в фармацевтической

и металлургической промышленности. Этот метод анализа основан на том, что между электрической проводимостью раствора и его концентрацией имеется определенная связь.

У большинства сильных электролитов при изменении концентрации электрическая проводимость сначала резко возрастает, достигает максимума, а затем начинает уменьшаться. Считают,

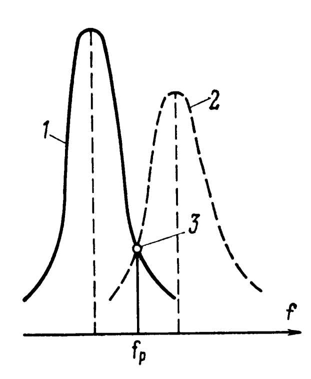


Рис. 32. Принцип отстройки от зазора с помощью резонансных контуров.

1 — резонансная кривая катушки датчика в свободном пространстве; *2* — резонансная кривая датчика на металле; *3* — рабочая точка.

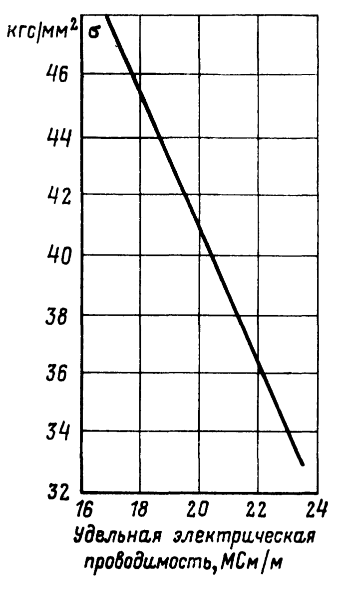


Рис. 33. Зависимость прочности закаленного листового дюралюминия от удельной электрической проводимости (сплав Д16, толщина листа 2,5 мм).

что электрическая проводимость смеси электролитов суммируется пропорционально относительной концентрации каждого элемента.

Индукционные датчики с наибольшим эффектом применяют для измерения высоких концентраций сильных электролитов при частоте возбуждающего поля 15—50 МГц.

28. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В современном автомобильном двигателе около 50% всех стальных деталей — это термически обрабатываемые детали, в авиационном двигателе — 85—90%. Их подвергают термической, химико-термической обработке, наклепу, механической обработке, шлифованию. Все это делается для того, чтобы обеспечить прочность, твердость, ударную вязкость материала детали. Казалось бы,

никакого контроля за качеством детали в этом случае не нужно. Температура печи, время выдержки — неоднократно проверенные постоянно действующие факторы.

И все-таки брак возможен. Поэтому проверяют твердость готовых деталей, а несколько контрольных образцов разрывают, определяя их прочность на разрыв. ГОСТ предписывает выполнять эти две операции.

На каждом заводе твердость стальных деталей измеряют десятки рабочих. Попытки заменить эту трудоемкую операцию измерением магнитных характеристик делаются более 50 лет. Но у каждой стали свои особенности, различна и технология изготовления деталей. Поэтому учеными исследуются связи между механическими и электромагнитными характеристиками сталей с учетом особенностей технологии, исходной структуры. Центром этих исследований является Институт физики металлов Академии Наук СССР в Свердловске. Ученые этого института во главе с его директором д. т. н. М. Н. Михеевым проводят систематические исследования влияния механических свойств сталей на такие характеристики, как коэрцитивная сила, остаточная магнитная индукция, основная кривая намагничивания, начальная и максимальная магнитная проницаемость и др.

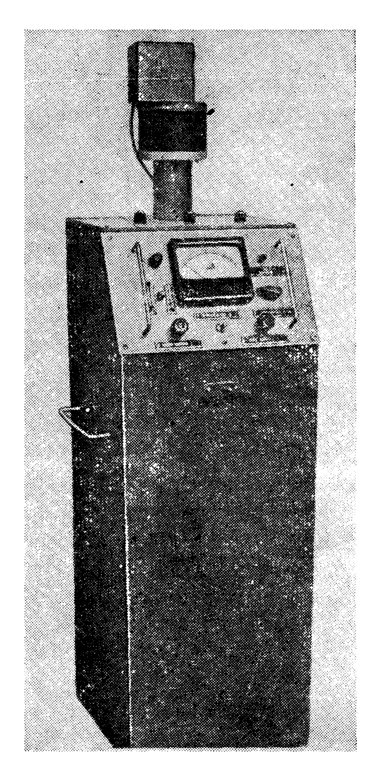


Рис. 34. Полуавтомат для контроля твердости.

При оценке качества термической обработки стальных деталей в работах института важное место занимают коэрциметрические методы. Еще во время Великой Отечественной войны на Челябинском тракторном заводе М. Н. Михеевым и его сотрудниками был организован контроль твердости гусеничных траков по значению коэрцитивной силы.

Измерение коэрцитивной силы включает намагничивание и размагничивание контролируемого образца. Обе эти операции осуществляются на постоянном токе. При этом добывается информация о состоянии металла по всему объему образца или детали.

Для контроля болтов, шпилек и других мелких деталей применяют полуавтоматы (рис. 34), в которых деталь под тяжестью собственного веса пролетает через постоянное магнитное поле, намагничивается и своим полем индуцирует э. д. с. в измерительной катушке. Возникающий сигнал после усиления используется для управления сортирующим устройством.

Используются для контроля мелких деталей и методы электромагнитной структуроскопии, когда на деталь воздействуют переменным электромагнитным полем. Для этих испытаний применяют приборы с проходной катушкой.

Взаимодействие переменного электромагнитного поля, созданного катушками индуктивности, с ферромагнитным материалом вызывает в электрической системе датчика два противоборствующих эффекта: с одной стороны, увеличение индуктивности из-за уменьшения рассеяния магнитного поля, зависящего от величины магнитной проницаемости, а с другой стороны, уменьшение индуктивности и рост потерь на тепло, вызванных действием вихревых токов. При ярко выраженном поверхностном эффекте на частотах в десятки и сотни килогерц превалируют вихревые токи На частотах до 100—200 Гц влияние вихревых токов существенно меньше.

Производство интересует не сами электрические и магнитные характеристики, а структура и свойства материала полуфабрикатов, деталей и изделий. Получили распространение электромагнитные структуроскопические устройства с проходными катушками, включенными в мостовые или дифференциальные схемы. Объектами испытаний в них служат заготовки, прутки, проволока, трубы или массовые детали (иглы, крепеж, детали шарикоподшипников) небольших размеров. Подобные контрольно-испытательные установки могут быть собраны из типовой электрорадиоизмерительной аппаратуры: генераторов, усилителей, осциллографов, вольтметров. Отечественная промышленность в течение длительного времени выпускала электромагнитные структуроскопы ЭМИД и несколько его разновидностей (ДИ-4, АСК и др). Индикатором в структуроскопах типа ЭМИД служит электронно-лучевая трубка. При малых токах намагничивания на экране прибора видна синусоида (обычно один ее период), которую можно перемещать относительно центра экрана изменением фазы опорного напряжения. По мере увеличения тока в возбуждающей обмотке э. д. с. искажается. Металл начинает «генерировать» высшие гармоники. Пробор позволяет измерять амплитуду и фазv выходного напряжения датчиков, дифференцировать или интегрировать это напряжение.

Метод, основанный на анализе изменений амплитуд и фаз гармоник измеряемого сигнала, иногда называют методом высших гармоник. В сочетании с подмагничиванием постоянным полем он позволяет значительно увеличить возможности электромагнитной структуроскопии.

29. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ

Закалка увеличивает электрическое сопротивление сталей, при отпуске оно уменьшается, а магнитная проницаемость растет. Наиболее резко электрическое сопротивление падает в интервале температур отпуска 100—300°С при наибольшей скорости распада мартенсита. В доэвтектоидных и заэвтектоидных сталях имеются парамагнитные составляющие: аустенит или интерметаллические соединения железа и ферромагнитные составляющие: мартенсит и перлит. Магнитные характеристики сталей определяются количеством ферромагнитной фазы. Она зависит от содержания углерода, Чем больше углерода, тем эта фаза меньше.

По мере уменьшения степени дисперсности продуктов отпуска магнитная проницаемость и остаточная индукция возрастают, а коэрцитивная сила уменьшается. Коэрцитивная сила, так же как и твердость, зависит от степени дисперсности и количества карбидов, вкрапленных в так называемое α-железо. При температуре отпуска 200—450°С для большинства конструкционных сталей существует однозначная зависимость между показаниями приборов ЭМИД и твердостью при условии небольших относительных колебаний размеров и предварительной (до термообработки) подготовки структуры металла.

Из исследуемой партии отбирают две одинаковые по показаниям прибора детали, одну из которых подвергают микроанализу, а вторую оставляют в качестве эталонного образца. При сильном разбросе показаний детали разбиваются на ряд групп и для каждой группы используют свои эталонные образцы. Успех во многом зависит от выбора образцов для настройки прибора.

При разработке методики контроля стальных деталей по твердости необходимо иметь два образца со средней твердостью — по одному на верхний и нижний пределы сортировки — и одну сырую деталь. При этом весьма важно, чтобы детали имели минимальный разброс по размерам. Обычно при изготовлении образцов обрабатывают сразу несколько деталей и одну из них подвергают металлографическому и химическому анализам. Показания прибора при испытании сырой детали должны выходить за установленные границы сортировки.

Для предварительной подготовки структуры, в особенности горячекатаного материала, приходится вводить дополнительную нормализацию заготовок. Успешному решению задачи отбраковки деталей, обработанных по неправильному режиму, может помочь предварительная разбраковка деталей на группы по показаниям прибора в исходном состоянии. После обработки каждая из этих групп проверяется по своим, заранее выбранным образцам. В массовом производстве находит применение способ сортировки деталей, не соответствующих эталонному образцу по структуре или твердости, с помощью индикаторов фиксированных напряжений и устройств, ограничивающих пороги границ сортировки.

Накоплен значительный опыт контроля качества термической обработки плунжерных пар различных агрегатов двигателей из стали ХВГ.

Влияние обезуглероженного слоя может полностью перекрыть полезную информацию о качестве термообработки, хотя наличие значительного обезуглероженного слоя после термической обработки также свидетельствует о плохом ее качестве.

30. СОРТИРОВКА СТАЛЕЙ

В течение многих лет для сортировки сталей по маркам применяют метод термо-э. д. с., использующий нагреватель и высокочувствительный гальванометр. Для разделения двух-трех марок материала применяют электромагнитные структуроскопы. Конструкционные стали марок 30ХГСА, 20ХН3А, 3Х13, 2Х13, сталь 45, сталь 35, 20ХН3А, сталь У10А и сталь 20 различают на приборах ЭМИД при небольшой чувствительности (рис. 35).

При разработке методики контроля марок сталей определяют границы разброса показаний (полоса рассеяния), подбирают ток намагничивания, канал работы и чувствительность прибора. Перед испытаниями от прутка с наименьшим разбросом показаний по длине отрезают три образца. Их используют для настройки прибора и анализа химического состава. Чувствительность и ток намагничивания выбираются из условий наилучшей различимости кривых на экране прибора. Обычно значение этого тока равно 0,2—0,7 А.

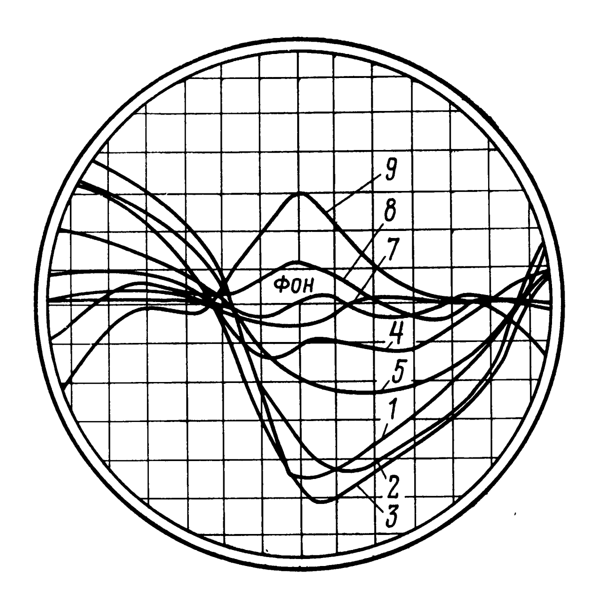


Рис. 35. Характерные показания прибора ЭМИД при сортировке 9 марок сталей (ток 0,3 А; в компенсационной катушке образец из стали 25).

Проверяют марку материала в штангах и прутках диаметром меньше 30 мм, так как прутки большего диаметра имеют «отбой» — выбитую на торце маркировку. Методика входного контроля состоит в следующем: от одного прутка каждой плавки отрезается образец для анализа химического состава и направляется в спектральную заводскую лабораторию. При положительных результатах анализа делается заключение о соответствии марки стали. Оставшаяся часть прутка разрезается на две половины, которые служат стандартными образцами для данной плавки стали. Образцы помещают в катушки для установки рабочего режима прибора и выравнивания полученной на экране кривой. Затем один из образцов удаляют и вместо него в катушку поочередно вводятся контролируемые прутки.

Если некоторые прутки не укладываются в указанные пределы, то их отбраковывают, сортируют на группы по характеру кривых и производят дополнительный анализ образцов.

Исправность прибора проверяют в начале работы путем сравнения сталей с близкими составами. Например, при контроле стали 35 берут прутки такого же диаметра из стали 25 и стали 45. Режим работы выбирают таким, чтобы в центре экрана прибора получилось наибольшее различие между кривыми, соответствующими этим маркам. Высокая разрешающая способность метода позволяет в ряде случаев рассортировать прутки (штанги) одной марки, но различных плавок, что способствует поплавочному запуску сталей в производство и снижению брака в термическом цехе.

Нередко нужно выявить детали из стали данной марки при их перепутывании с деталями из других марок стали. Например, деталь из стали 40Х можно надежно отделить от деталей из сталей 30ХГСНА, 35, 45, 12ХМФ, 12ХГМФ, 12Х5МА, 30ХГСА.

Приборы типа ЭМИД эффективно используют для контроля и сортировки по маркам электродов, предназначенных для электродуговой сварки стали. Обмазка электродов влияния на показания приборов не оказывает. Стандартными образцами для настройки приборов служат электроды, проверенные спектральным методом. Электроды, изготовленные из материалов разных марок (например, 18ХМА и СВО8А), надежно рассортировываются.

31. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Наилучшими свойствами обладает стальная деталь с вязкой сердцевиной, но очень твердой поверхностью. Высокая твердость обеспечивается при поверхностном насыщении стали углеродом (цементирование), азотом (азотирование), тем и другим одновременно (нитроцементация). При сочетании с обработкой теплом эти процессы называют химико-термической обработкой, которая значительно повышает долговечность деталей, их усталостную и контактную прочность. Существующая заводская практика контроля качества слоев, полученных химико-термической обработкой, сводится к определению их толщины (глубины) по шлифам на образцах-свидетелях. Многие детали со шлифованными и притертыми поверхностями не допускают не только вырезки пробы, но и зачистки их для испытания на твердость. Из-за поверхностного обезуглероживания контроль твердости не дает правильных представлений о качестве слоя, так как наличие обедненных углеродом слоев на поверхности детали приводит к появлению растягивающих напряжений значением до $3 \cdot 10^8$ Па.

Для оценки качества слоев, полученных химико-термической обработкой, нужно измерить глубину слоя, характер распределения диффузионного элемента, учесть структурное состояние и, наконец, величину и характер распределения напряжений.

Первые опыты по контролю цементированных слоев проводились на цилиндрических образцах из стали 12ХН3А и стали 25 при частотах возбуждения проходных датчиков 50, 600 Гц, 3 и 15 кГц.

При отработанном технологическом режиме оценка концентрации углерода на поверхности детали может оказаться достаточной для суждения о качестве цементации. Однако решение этой задачи осложняется рядом факторов. Во-первых, показания высокочастотных приборов пропорциональны содержанию углерода лишь до

0,63—0,9%, а в большинстве случаев поверхностное содержание углерода при цементации превышает 1,1%; во-вторых, поверхность детали, цементированной в твердом карбюризаторе, оказывается обезуглероженной на 40 мкм и более. Уменьшение содержания углерода приводит к росту электрической проводимости и магнитной проницаемости не менее чем в 2—3 раза, что существенно изменяет информацию при испытаниях на высоких частотах

Метод вихревых токов пригоден для определения концентрации углерода, если она не превышает 0,9—1,0%; поэтому часто контроль проводят после снятия верхних слоев металла. Метод обеспечивает решение и задачи по определению насыщенности низкоуглеродистых сталей углеродом.

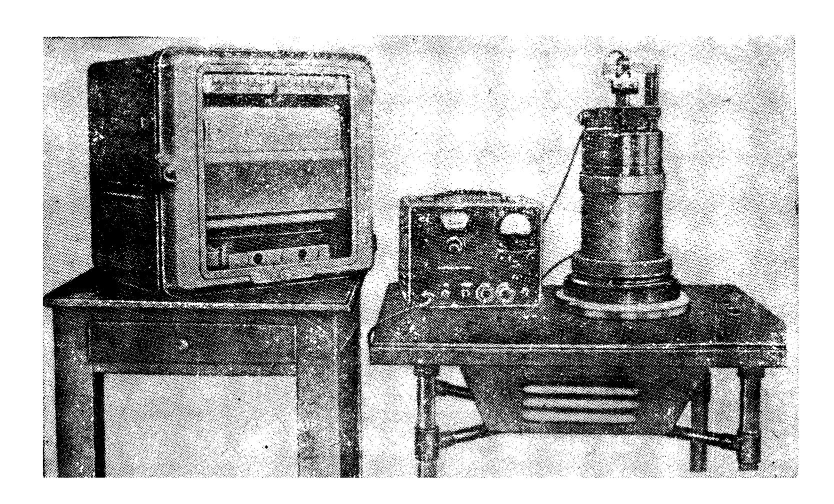


Рис. 36. Устройство для контроля качества азотирования.

Наличие азота в стали приводит к увеличению удельного электрического сопротивления. С повышением температуры азотирования скорость диффузии азота в глубь металла возрастает, при этом концентрация азота на поверхности уменьшается и твердость материала становится ниже. Нарушение режимов азотирования приводит к скалыванию азотированного слоя, точечному выкрашиванию, а также образованию трещин на внутренней поверхности деталей.

Качество азотированных слоев на шлифованных деталях из сталей 38ХМЮА и 18ХНВА проверяется резонансными приборами с накладной катушкой на частоте 3—5 кГц (рис. 36). Технологическая глубина азотирования в этом случае составляет 0,5—0,7 мм. Максимальная разность магнитной индукции между поверхностным азотированным слоем и сердцевиной стали 38ХМЮА около 0,8 Т. Коэрцитивная сила азотированного и неазотированного слоев у этой стали соответственно равны 27 и 6 А/см.

Показания проборов, использующих более высокие частоты, удается связать с поверхностной твердостью.

Детали, подвергающиеся химико-термической обработке, обычно шлифуют. При этом поверхность детали нагревается, что приводит к изменению структуры тонкого поверхностного слоя. При нарушении режима шлифования возникают опасные дефекты: прижоги, шлифовочные трещины, сколы и выкрашивания.

Прижоги сопровождаются увеличением объема металла из-за теплового расширения Прижоги отпуска и прижоги закалки снижают прочность детали.

Прижоги на сталях мартенситного класса и на некоторых цементируемых сталях хорошо выявляет амплитудно-фазовый дефектоскоп ДНМ-500, в котором применена испытательная частота 0,5 МГц

Отработка методики контроля производилась на шлифованных образцах с различной степенью подачи режущего камня, а также на образцах, небольшие поверхностные участки которых были нагреты с помощью установки для быстрого разогрева, разработанной Н. М. Родигиным. На деталях из высокопрочных сталей обнаруживали прижоги закалки размером 2×2 мм.

Сканировать датчик прибора вручную по сложной поверхности таких деталей, как лопатка компрессора, трудно. Поэтому для контроля одного из типов лопаток применяют механизированную установку, в которой датчик перемещается по поверхности изделия с шагом 1—2 мм; он установлен в шарнире Гука и поэтому всегда располагается по нормали к поверхности контроля. Ход движения датчика задается шаблоном Результаты контроля фиксируются на электротермической бумаге

Индукционными приборами с очень маленькими накладными датчиками на некоторых сталях удается выявлять мелкие штриховые прижоги. Однако вместе с прижогами на цапфах и торцах зубьев крупномодульных цементированных шестерен выявляются и обезуглероженные участки.

На одном из заводов в Ленинграде разработана установка для контроля гильз цилиндров дизеля с низкочастотным и высокочастотным каналами. Отбраковываются детали с недостаточной глубиной слоя и некоторыми поверхностными дефектами.

32. ШУМЫ, ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ И НЕЛИНЕЙНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ СРЕД

На современных высокопроизводительных прокатных станах необходимо измерять линейную скорость, достигающую 35 м/с. Разработаны электромагнитные измерители линейной скорости, обеспечивающие автоматическое измерение длины полосы, синхронизацию раскатных рольгангов, измерение натяжения металла и решение других задач. Созданы измерители линейной скорости, использующие в качестве источников постоянные, пульсирующие, бегущие электромагнитные поля Разработана схема использования для этой цели и эффекта Баркгаузена Скорость перемагничивания доменов, отвечающих за этот эффект, в среднем пропорциональна скольжению. Шумовая э д с возникает и при весьма медленном перемагничивании металла (т е. при малом скольжении) Устройство, которое использует этот эффект, состоит из плоского статора, создающего бегущее магнитное поле, со

скоростью, пропорциональной частоте возбуждения статора. Если скорость полосы меньше, то в измерительной катушке датчика индуцируется шумовая э. д. с. Возникший сигнал воздействует на генератор. При достижении синхронизма шумовая э. д. с. исчезает. В этот момент производят отсчет скорости.

В новых современных структуроскопах для контроля качества ферромагнитных материалов создаются каналы, измеряющие третью, пятую и даже седьмую гармоники. При этом существенно увеличивается информация, уменьшается влияние зазора между катушкой и металлом.

Сделана попытка использовать метод нелинейных искажений для контроля немагнитных металлов. При этом используется нелинейность вихревых токов, связанная, например, с их парамагнитностью. В одном из вариантов прибора, построенного В. А. Сергеевым, частота сигнала выбрана равной 10 кГц. Сумма гармоник поступает через фильтр верхних частот на избирательный вольтметр, измеряющий третью гармонику. Этот сигнал очень мал. Чтобы уменьшить влияние помех, пришлось вводить специальные устройства, управляющие сигналом первой гармоники. Диапазон измерений у избирательного вольтметра 0,1 мВ—1 В. Напряжение основного сигнала 10 мВ—1 кВ. Метод был опробован при решении самых различных задач. Так, оказалось, что в устье трещины у образца, выполненного из слабомагнитного сплава, возникает дополнительная нелинейность. Большую нелинейность вносят различные сорта латуней и бронз. В сплавах на железоникелевой основе при перегреве нелинейность возникает за счет слабой магнитной фазы, что позволяет оценивать степень перегрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабат Г. И.** Электричество работает. М., «Энергия», 1964, 655 с.

2. **Бабат Г. И.** Индукционный нагрев и его промышленное применение. М., «Энергия», 1965, 552 с.

3. **Брицын Н. Л.** Нагрев в электрическом поле высокой частоты. М., «Машиностроение», 1965, 95 с.

4. **Герасимов В. Г.** Электромагнитный контроль однослойных и многослойных изделий. М., «Энергия», 1972, 182 с.

5. **Дорофеев А. Л.** Электроиндуктивная дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1967, 230 с.

6. **Дорофеев А. Л., Никитин А. И., Рубин А. Л.** Индукционная толщинометрия. М., «Энергия», 1969, 150 с.

7. **Дорофеев А. Л.** Индукционная структуроскопия. М., «Энергия», 1973, 177 с.

8. **Жуков Ю. П., Кулаков М. В.** Высокочастотная безэлектродная кондуктометрия. М., «Энергия», 1968, 106 с.

9. **Каден Г.** Электромагнитные экраны. М., Госэнергоиздат, 1957, 327 с.

10. **Кацнельсон О. Г. и Эдельштейн А. С.** Магнитная подвеска в приборостроении. М., «Энергия», 1966, 92 с.

11. **Киренский Л. В.** Магнетизм. М., «Наука», 1967, 195 с.

12. **Кифер И. И.** Характеристики ферромагнитных сердечников. М., «Энергия», 1967.

13. **Ламмеранер И., Штафль М.** Вихревые токи. М., «Энергия», 1967, 208 с.

14. **Лещенко И. Г.** Неразрушающий контроль ферромагнитных материалов и изделий методом высших гармоник. Изд. Томского ЦНТИ, 1971, 188 с.

15. **Николаев Е. И., Коротин И. М.** Термическая обработка токами высокой частоты. М., «Высшая школа», 1970, 325 с.

16. **Поль Р. В.** Учение об электричестве. М, Физматгиз, 1962, 515 с.

17. **Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.** Накладные и экранные датчики. М., «Наука», 1967, 143 с.

18. **Чернышев И. А.** Электромагнитное воздействие на расплавы. М., Металлургиздат, 1963, 84 с.

19. **Развитие** неразрушающих методов контроля. Сборник статей под ред. Стенфорда и Хирона. М., Машгиз, 1963, 181 с.

20. **Проблемы** неразрушающего контроля. Сборник статей. Изд. «Штиинца», г. Кишинев, 1973, 122 с.

21. **Les sessais** nondestructifs. — «Rev. politechn.», 1973, № 1318.

22. **Электронный** контролер состава монеты. Фр. патент № 2187123 31/7. 1972 г.

23. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. М., «Высшая школа», 1967, 689 с.
24. **Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.** Расчет индуктивностей. Л., «Энергия», 1970, 416 с.
25. **Рабкин Л. И., Новикова З. Н.** Катушки индуктивности на ферритовых сердечниках. Л , «Энергия», 1972, 152 с.
26. **Справочник** по радиотехнике. Под ред. Б. А. Смиренина. М., Госэнергоиздат, 1950.

ОГЛАВЛЕНИЕ

АЛЕКСАНДР ЛЕОНТЬЕВИЧ ДОРОФЕЕВ

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

Редактор А. Д. Покровский
Редактор издательства Р. М. Малинин
Обложка художника А. А. Иванова
Технический редактор Т. А. Маслова
Корректор З. Б. Драновская

ИБ № 535

Сдано в набор 20/VII 1976 г. Подписано к печати 5/I 1977 г.
Т-03703 Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 3,78 Уч.-изд. л 4,93
Тираж 30 000 экз. Зак. 793 Цена 37 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Цена 37 коп.